



Université Saad Dahlab. Blida-1

Faculté de Technologie

Département des Énergies Renouvelables

Mémoire de Master option : **Conversion thermique**

Thème :

**Etude De L'implémentation d'un Système
de Récupération de la Chaleur Fatale WHE
(Waste Heat Energy) : Cas de la société
BIBILA (Blida)**

Présenté par l'étudiante : SEHIL Rabha Nesrine

Soutenu devant le jury composé par :

Monsieur M. Merzouk	Professeur	USDB	Président
Mme N.E.Khlelafa	MCB	USDB	Encadreur
Monsieur K.KACI	MAA	USDB	Examineur
Monsieur D.LAFERI	MCB	USDB	Examineur

Mars 2022

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Au terme de ce travail, je tiens à témoigner ma profonde gratitude à Dr Nawal El-kahina KHELALFA pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude.

Je la remercie pour son suivi et pour le temps qu'elle a consacré et aussi pour les précieuses informations qu'elle m'a prodiguées avec intérêt et compréhension tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier également Mr LONGO Adlene le directeur de technique et méthode de la société BIBILA et de Mr HAMAIDI Moussa pour m'aider à accomplir ce travail.

Merci aux membres de jury d'avoir bien voulu examiner et juger ce travail. Mr Belamiri Riad et les doctorants du département pour leurs précieux apports tout au long de ma démarche.

Finalement, je remercie tout mes chers ami(e)s et collègues qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail.

Dédicace

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à Allah le tout puissant.
Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de reconnaissances et de remerciement :
à mon père et à ma mère pour leurs soutiens moraux, financier et pour leurs sacrifices
et aussi je remercie également ma seconde mère Loubna et mes frères A mes chers
parents, qui m'ont aidé et m'encourager.

A mes chers frères et mes chères tantes, leurs familles.

Mr AICHOUBA.A et mon unique sœur Chougrane

A toutes mes chères amies : Kawtar, Chaima, Chifa, Houda ,Rajaa
Camelia et Youssera.

Résumé

La chaleur fatale ou waste heat energy (WHE) est une source d'énergie renouvelable ayant gisement énergétique immense. Qu'il faut cela valorisé (directe ou indirecte). Pour cela, des installations de récupération doivent être conçues sur la base de diverses technologies existantes. L'objectif de ce projet est de répondre à la problématique de la société BIBILA qui est de remplacer l'actuel système de chauffage du chocolat basé sur des résistances électriques. La solution est de concevoir une installation de récupération de la chaleur fatale. Nous proposons une cuve de stockage d'eau considéré comme système d'appoint et un échangeur de chaleur pour le transfert thermique entre avec les fluides (gaz de fumée – eau). Notre développons un outil d'aide à la décision DSS (Décisions Support System) sert à transcrire une méthodologie de récupération de la chaleur fatale avec le choix de l'échangeur optimale et son dimensionnement si ce dernier n'est pas disponible chez les fournisseurs une méthode d'optimisation heuristique de descente est appliquer dans le choix optimale.

Mots clés : chaleur fatale, récupération de la chaleur, échangeur de chaleur, méthode heuristique, choix technologique, DSS, dimensionnement.

Abstract

The fatal heat or waste heat energy (WHE) is a renewable energy source having huge energy deposit. That it is necessary to value (direct or indirect). To do this, recovery facilities must be designed on the basis of various existing technologies. The objective of this project is to address the problem of the company BIBILA which is to replace the current chocolate heating system based on electrical resistances. The solution is to design a fatal heat recovery facility. We offer a water storage tank considered as a back-up system and a heat exchanger for heat transfer between with fluids (smoke gas – water). We are developing a DSS (Decision Support System) decision support tool is used to transcribe a fatal heat recovery methodology with the choice of the optimal heat exchanger and its dimensioning if the latter is not available from the suppliers a descent heuristic optimization method is applied in the optimal choice.

Keywords: fatal heat, heat recovery, heat exchanger, heuristic method, technological choice, DSS, dimensioning.

الملخص

الحرارة القاتلة أو الطاقة الحرارية المهدرة (WHE) هي مصدر طاقة متجددة له رواسب طاقة ضخمة. أنه من الضروري تقييم (مباشر أو غير مباشر). ولتحقيق ذلك، يجب تصميم مرافق الإنعاش على أساس مختلف التكنولوجيات القائمة. الهدف من هذا المشروع هو معالجة مشكلة شركة BIBILA التي تهدف إلى استبدال نظام تسخين الشوكولاتة الحالي بناءً على المقاومات الكهربائية. الحل هو تصميم منشأة قاتلة لاستعادة الحرارة. نقدم خزاناً لتخزين المياه يعتبر نظاماً احتياطياً ومبادلاً حرارياً لنقل الحرارة بين السوائل (غاز الدخان - الماء). نحن بصدد تطوير أداة دعم القرار DSS (نظام دعم القرار) تستخدم لنسخ منهجية استعادة الحرارة القاتلة مع اختيار المبادل الحراري الأمثل وأبعاده إذا لم يكن الأخير متاحاً من الموردين، يتم تطبيق طريقة الاستدلال التجريبي للهبوط في الاختيار الأمثل.

الكلمات المفتاحية: الحرارة المهدرة ، استرداد الحرارة ، المبادل الحراري ، الطريقة الإرشادية ، الاختيار التكنولوجي

، DSS ، التحجيم.

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Tableau des indices	

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1:Recherche bibliographique

1.1 Introduction.....	2
1.2 LES SOURCES ENERGETIQUES:.....	2
1.3 LA CONSOMMATION D'ENERGIE:	2
1.3.1 La Chaleur fatale	3
1.4 LES AVANTAGES DE LA RECUPERATION DE LA CHALEUR FATALE	6
1.5 LA VALORISATION DE LA CHALEUR FATALE.....	7
1.5.1 Sous forme de chaleur :.....	7
1.5.2 Avec un changement de vecteur énergétique par la production d'électricité	7
1.6 TECHNOLOGIES DE VALORISATION	8
1.7 ETAT DE L'ART :	9
1.8 CONCLUSION.....	15

Chapitre 2:Généralités sur les échangeurs

2.1 INTRODUCTION.....	17
2.2 LA FICHE TECHNIQUE DE LA SOCIETE D'ETUDE.....	17

2.3 LA PROBLEMATIQUE.....	17
2.4 DEFINITION DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR :	18
2.5 PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT D'ECHANGEUR	18
2.6 LES DIFFERENTS TYPES D'ECHANGEURS DE CHALEUR :	19
2.6.1 La famille tubulaire	19
2.6.2 La famille à plaques	21
2.7 CRITERES DE CLASSIFICATION DES ECHANGEURS.....	24
2.7.1 Type de contact	24
2.7.2 Classification suivant la disposition des écoulements	24
2.7.3 Classification fonctionnel :	25
2.7.4 Classement suivant la compacité de l'échangeur.....	25
2.7.5 Classification suivant la nature du matériau de la paroi d'échange	26
2.7.6 Classification technologique	26
2.7.7 Classification selon le nombre des fluides	27
2.8 DEFINITION DE L'ENCRASSEMENT	27
2.8.1 Classification d'encrassement.....	28
2.9 L'EVALUATION DE PERFORMANCES THERMIQUES D'UN ECHANGEUR	28
2.9.1 Utilisation de la Méthode de la différence de température logarithmique moyenne ΔTLM	29
2.9.2 Utilisation de la méthode de Nombre d'Unité de Transfert (NUT) :	35
2.10 LES ETAPES DE DIMENSIONNEMENT DES ECHANGEURS	41
2.10.1 Le choix technologique	41
2.11 Conclusion.....	41

**Chapitre 3 Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération
de la chaleur fatale**

3.1 INTRODUCTION.....	43
3.2 L'INSTALLATION ACTUELLE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.3 LA SOURCE DE CHALEUR FATALE RECUPERABLE.....	44
3.4 LES INSTALLATIONS PROPOSEES	45
3.5 L'INSTALLATION VALIDEE.....	46
3.6 LA CUVE DE STOCKAGE DU CHOCOLAT LIQUIDE	46
3.7 LA NOUVELLE CUVE DE STOCKAGE A INSTALLER.....	47
3.8 LE CHOIX TECHNOLOGIQUE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA CHALEUR FATALE	49
3.8.1 La complexité de dimensionnement des échangeurs de chaleur :.....	49
3.8.2 Les critères de choix de l'échangeur qui convient.....	50
3.9 DEFINITION ET FONCTIONNEMENT DES METHODES HEURISTIQUE	50
3.10 METHODOLOGIE DE RESOLUTION DU PROBLEME	52
3.11 L'ORGANIGRAMME DU CHOIX DE LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA CHALEUR FATALE :.....	52
3.12 CONCLUSION.....	55

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1 INTRODUCTION :.....	57
4.2 La description et manipulation de DSS :.....	57
4.2.1 La 1ere étape : page une.....	57
4.2.2 La 2 ème étape : page deux.....	59
4.2.3 La 3 ème étape : page trois.....	63
4.3 LES RESULTATS ET DISCUSSIONS :	64

4.4 LES PARAMETRES FIXES:	64
4.4.1 La 1ere simulation :.....	65
4.4.2 La 2 ème simulation :.....	66
4.4.3 La 3 ème simulation :.....	66
4.4.4 La 4 ème simulation :.....	66
4.5 LES TYPES PROPOSER POUR LA REALISATION:.....	67
Conclusion générale	68
Liste des références	70

Liste des Figures

Figure 1-1 : Consommation prévisionnelle d'énergie mondiale entre 1990 et 2035 (4).....	3
Figure 1-1: origines et caractéristiques des rejets thermiques (7).....	5
Figure 2-1 : le principe de fonctionnement d'un type d'échangeurs thermiques. (29)	19
Figure 2-1 : un échangeur monotube (31).....	20
Figure 2-2: un échangeur coaxial (31).	20
Figure 2-3: un échangeur à tubes séparés. (32).....	20
Figure 2-4: une batterie à ailettes . (31)	20
Figure 2-5 : un échangeur tubes et calandre. (32).....	21
Figure 2-6 : Echangeur à plaque (35).....	21
Figure 2-7: Echangeur à plaques et joints (ALFA LAVAL). (36).....	22
Figure 2-8: Echangeur à plaques soudées (ALFA LAVAL) (36).....	22
Figure 2-9: les composants et fonctionnement d'un échangeur à plaques brasées. (36)	23
Figure 2-10: Aeroréfrigérant	23
Figure 2-11: échangeur rotatif .Figure 0-11: Aeroréfrigérant Figure 2-12: à lit fluidisé	24
Figure 2-12 : classification des échangeurs de chaleur selon le type de contact. (38).....	24
Figure 2-13: classification des échangeurs de chaleur selon la configuration de l'écoulement (38).	25
Figure 2-14: classification fonctionnelle des échangeurs. (37).....	25
Figure 2-15: classification des échangeurs selon la compacité. (38)	26
Figure 2-16: classification des échangeurs de chaleur selon la nature de matériau. (38)	26
Figure 2-17: classification technologique des échangeurs de chaleur. (38).....	27
Figure 2-18: classification des échangeurs selon le nombre de fluides (38).....	27
Figure 2-19: évolution des températures le long de l'échangeur de chaleur. (41).....	30
Figure 2-20: distribution de la température (échangeur contre courant) (40).	32
Figure 2-21 : schéma montre le flux de chaleur ϕ transmis dans un tube cylindrique (40)...	33
Figure 2-22: différentes représentation pour un échangeur contre-courant (40).	35
Figure 2-23 efficacité des deux échangeurs avec différentes disposition du fluide en fonction de NUT (40)	40
Figure 2-24: organigramme de dimensionnement d'un échangeur de chaleur. (44)	41
Figure 3-1 : processus de la société BIBILA. (45).....	44
Figure 3-1 : le modèle proposé n°1.	45
Figure 3-2 : le deuxième modèle proposé n°2.....	46
Figure 3-4: schéma d'une cuve de stockage a double parois (46)	Error! Bookmark not defined.
Figure 3-5 la cuve réel de stockage de chocolat existante au niveau de BIBILA (45)	47
Figure 4-1: partie imposé par le client.	57
Figure 4-2: le secteur d'application	58
Figure 4-3: type des pertes. Figure 4-4: niveau de température.	58
Figure 4-5: la forme d'énergie voulue. Figure 4-6: Type de fluide caloporteur.....	58

Figure 4-7: nombre de fluide rejeté.....	58
Figure 4-8: le rythme de nettoyage.	59
Figure 4-9: la partie du choix technologique.	59
Figure 4-10: la technologie de la récupération.....	60
Figure 4-11: le choix de type de contact début de choix.....	60
Figure 4-12:type de fluide choisi.	60
Figure 4-13: exemple d'un help qu'il va être affiché dans chaque matériaux différemment... 61	61
Figure 4-14: proposition pour type de courant. Figure 48: proposition de géométrie	61
Figure 4-15:exemple des help qui sera affiché au sein du choix de géométrie.....	61
Figure 4-16:les propositions des géométries et exemple d'un help des choix existants.....	62
Figure 4-17:les suggestions des dispositions des fluides et l'affichage un des helps d'un choix.	62
Figure 4-18:les propositions de fonctionnement.....	62
Figure 4-19:les types des fluides proposer avec leur valeur de résistance d'encrassement.....	62
Figure 4-20: les deux figures sont une page d'affichage du choix finale.	63
Figure 4-21: les choix prête dans notre cas qu'ils sont relié avec la partie imposé par le client.	64

Liste des tableaux

Tableau 1-les différentes sources énergétiques. [2] 2

Tableau 1-2 : le potentiel récupérable et les possibilités de valorisation de quelques exemples des rejets thermiques.[2] 5

Tableau 2-1 : Résistance thermique à l'encrassement des quelques fluides [40] 34

Tableau 2-2 : calcul de l'efficacité. [40] 39

Tableau 2-3 les relations de la méthode de NUT. [40] 39

Tableau 4-1 :les résultats atteindre concernant la variation de type del''échangeur à chaleur.65

Tableau 4-2 :les résultats achevé selon la variation de matériaux. 66

Tableau 4-3 :les résultats obtenus selon la disposition de fluide. 67

Tableaux des Nomenclature :

La lettre	Signification	unité
C_p	Chaleur spécifique	J/Kg.K
C	Le débit de capacité thermique massique	J/s.K
ε	L'efficacité de l'échangeur de chaleur	Sans unité
h	Coefficient de convection	W.m ⁻² .K
k	Coefficient de conduction	W/m.K
L	Longueur de cuve	M
m	Débit massique	Kg/s
φ	Le flux de chaleur	J/s
R_{en}	Résistance d'encrassement	W ⁻¹ .m ² .K
r	Rayon	Mm
S	Surface d'échange	m ²
T	La température	°C
U	Coefficient d'échange globale	W/m ² .°C
φ	Diamètre	Mm

Tableau des indices :

L'indice	La signification
air	l'air ambiant
c	Fluide chaud
e	Entrer
f	Fluide froid
min	Minimum
max	Maximum
u	Utilisation (la cuve de l' utilisation)
choc	Chocolat

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle, la consommation énergétique ne cesse d'augmenter. Durant la pandémie du COVID19, une diminution de 3.5% dans l'exploitation fut enregistrée en 2020. Mais en 2021, l'exploitation énergétique a rebondie avec 4.1% [1]. Ce qui montre que la demande est toujours en progression. Pour couvrir ce besoin énergétique, les chercheurs et les énergéticiens essayent de trouver d'autres sources tels que les énergies renouvelables.

Différents types de processus de divers secteurs (transport, habitat et industrie) génèrent des rejets énergétique sous différentes formes (cinétique, chimique et thermique) dans l'environnement. Cependant notre travail s'intéresse aux rejets thermiques. Il est alors nécessaire de mettre en place des systèmes de récupération de la « chaleur fatale » ou WHE « Waste Heat Energy ». Cela peut être réalisé selon deux voies : direct sous forme de chaleur ou indirecte sous formes électrique, mécanique et froid.

La récupération de la chaleur fatale est l'un des axes principaux qui engendre l'amélioration des performances économique et énergétique d'une installation. Dans notre cas la problématique posée par la société de BIBILA est que son actuel système de chauffage du chocolat utilise des résistances électriques qui sont très onéreuses et ont une durée de vie assez courte). La solution que nous proposons basée selon le mode de récupération direct sous forme de chaleur. On se doit de concevoir une installation de récupération de la chaleur fatale basée essentiellement sur la technologie des échangeurs de chaleur .L'objectif de ce présent travail est d'établir une méthodologie pour le choix technologique de la nouvelle installation de la récupération des rejets thermiques. Pour cela, un outil d'aide à la décision **DSS (Décision Support System)** est réalisé. Il est basé sur une méthode d'optimisation heuristique de descente. Le but est de choisir l'échangeur optimale (la configuration des écoulements, les matériaux, certaines caractéristiques des surfaces D'échange et déterminer la taille de l'échangeur) pour assurer les objectifs de l'industrie avec ses diverse contraintes.

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente une étude bibliographique sur la chaleur fatale WHE « Waste Heat Energy ». On développera dans ce qui suit les sources, les technologies de récupération, les domaines d'application, les types et les formes de transformation de cette énergie perdue. Nous terminerons le chapitre par un état de l'art sur des diverses applications de récupération de la WHE selon les trois secteurs l'industrie, transport et l'habitat.

1.2 Les sources énergétiques :

L'énergie est nécessaire pour toutes activités (l'industrie, le transport, le résidentiel et l'agriculture). Elle est fournie à partir des sources énergétiques primaires telles que renouvelable ou le fossile. Cela qui sont transformées en énergie secondaire. S'accompagne en général de pertes sous forme de chaleur et polluant l'atmosphère. Les différentes sources énergétiques sont dans le (tableau 1) ci dessous:

Tableau 1: les différentes sources énergétiques.[2]

Les sources énergétiques primaires	Les sources énergétiques secondaires
Hydrocarbures	Centrale nucléaire
Charbon	Centrale thermique à flamme
Uranium	Centrale solaire thermique a concentration
Rayonnement solaire	Centrale géothermique
Force Hydrauliques	Energie éolienne
Energie géothermique	Energie solaire photovoltaïque
Vent	Energie hydroélectrique
Biomasse et Déchets	Cogénération
Pétrole	
Gaz Naturel	

1.3 La consommation d'énergie :

À ce jour, certaines études ou enquêtes sur la chaleur résiduelle industrielle de certains

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

pays ont été réalisées, mais d'autres secteurs comme le commerce n'ont pas été pris en compte. Par conséquent, ce travail présente une nouvelle approche descendante pour l'estimation du potentiel de chaleur résiduelle des secteurs d'utilisation finale les plus courants (transport, industriel, commercial et résidentiel), y compris la production d'électricité à l'échelle mondiale. Il traite également de la distribution de la température de cette énergie inutilisée. L'évaluation révèle que 72 % de la consommation mondiale d'énergie primaire est perdue après conversion. Plus en détail, 63 % des flux de chaleur résiduaire considérés se produisent à une température inférieure à 100 °C, où la production d'électricité occupe la plus grande part, suivie des transports et de l'industrie: [3]

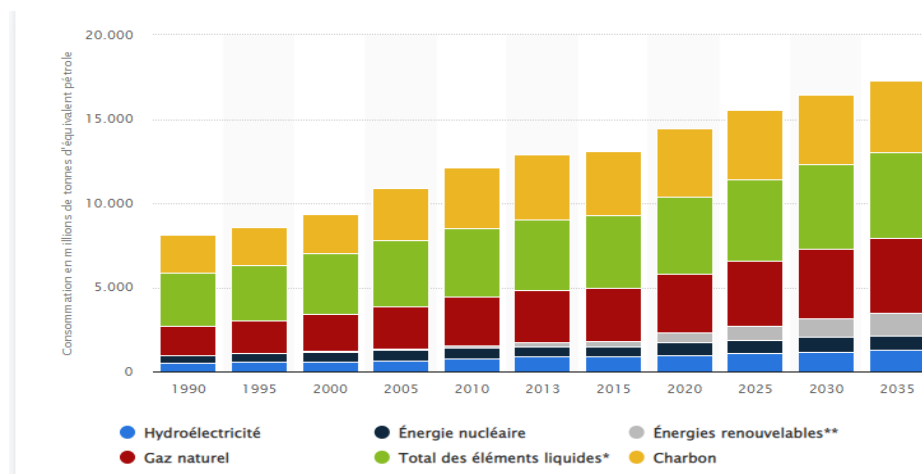


Figure 1-1 : Consommation prévisionnelle d'énergie mondiale entre 1990 et 2035 [4]

1.3.1 La Chaleur fatale [4]

La chaleur fatale représente la chaleur résiduelle provenant d'un processus ou d'un produit. La chaleur fatale, pourtant principalement connue sous le nom de « chaleur perdue » ou « waste energy », est donc une source énergétique récupérable.

❖ Les enjeux de la récupération de chaleur fatale :

La récupération de la chaleur fatale possède un large potentiel économique d'un point de vue énergétique. Cela devient donc pour les entreprises industrielles l'opportunité de faire des économies et de réduire la facture d'énergie. En effet, cette source énergétique inutilisée peut être valorisée thermiquement par deux axes complémentaires:

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

La valorisation en interne : permet de répondre aux besoins de chaleur de l'entreprise.

- **La valorisation en externe :** peut couvrir les besoins d'autres entreprises ou plus largement d'un territoire, grâce à un système de réseau de chaleur.

Outre cette valorisation thermique, la chaleur fatale peut aussi être convertie en électricité et servir encore une fois pour des usages internes ou externes.

❖ **Les sources de la chaleur Fatale :**

Sur un site industriel, les sources de chaleur récupérable sont variées en termes de localisation et de caractéristiques (types des rejets, niveaux de températures). Elles concernent tous les postes de consommation d'énergie de l'usine, qu'ils soient directement liés aux procédés de fabrication ou annexes à la production. De façon générale, la chaleur fatale peut être issue de :

- Sites industriels.
- Raffineries.
- Sites de production d'électricité.
- STEP (Station d'Épuration des eaux usées).
- UIOM (Usine d'Incinération des ordures Ménagères) .
- Data Center.
- Hôpitaux et autres sites tertiaires...

Il existe deux critères de qualification des rejets thermiques qui sont :

a) **Le premier critère :** de qualification par sa nature est:

- ❖ **Liquide :** eaux usées, purges de chaudière etc.
- ❖ **Gazeux :** fumées, air chaud etc.
- ❖ **Diffus :** pertes par les parois, fuites sur les réseaux etc.

Le captage de ces rejets est plus ou moins facile (rejets liquides dans les purges de chaudières) , suivis des rejets gazeux dans les fumées, les diffus plus difficiles à capter (voir figure 1- 2).

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

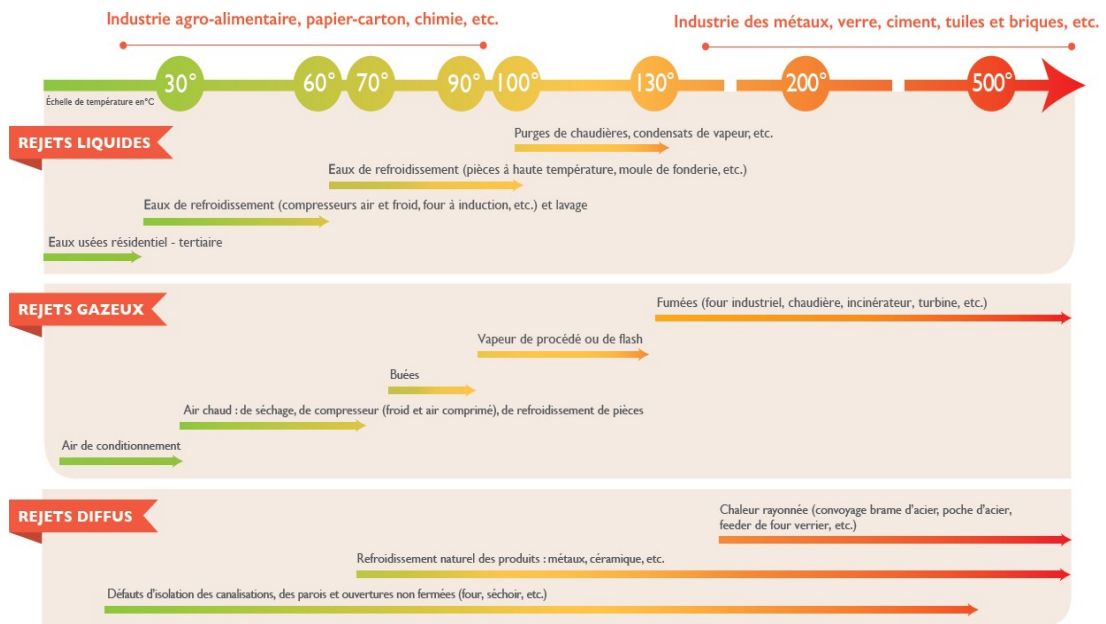


Figure 1-2: origines et caractéristiques des rejets thermiques. [7]

b) Le second critère est son niveau de température :

Qui déterminant directement le potentiel récupérable et les possibilités de valorisation de cette chaleur. Selon le tableau (1-2), quelques exemples:

Tableau 1-1 : le potentiel récupérable et les possibilités de valorisation de quelques exemples des rejets thermiques.[2]

Fumée de combustion	Potentiel de récupération de chaleur plus élevé à température élevée
Effluent sous forme vapeur	Récupération élevée à température élevée avec potentiel de récupération de chaleur latente sur les effluents
Convection et rayonnement de l'extérieur des équipements	Potentiel de récupération faible : peut être utilisé pour le préchauffage de l'air ou le chauffage des locaux
Chaleur d'un fluide de refroidissement (huile, eau)	Potentiel de récupération faible : utile dans le cas du préchauffage de l'eau réseau
Chaleur des unités de condensation des groupes froids	Haute qualité si la demande en froid peut être réduite et basse qualité si le groupe froid est utilisé en tant que pompe à chaleur
Chaleur des produits de procédés	Potentiel de récupération variable selon la température des produits et la présentation du produit (compact, divisé, etc.)

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Chaleur des effluents gazeux et liquides

Qualité variable selon le niveau de température et la manière dont les effluents sont collectés et canalisés

1.4 Les avantages de la récupération de la chaleur fatale [8]

On peut avoir divers avantages au niveau de:

➤ L'entreprise :

- Limiter l'achat d'énergie extérieure, et ainsi avoir une meilleure visibilité sur les coûts de production. L'énergie thermique est disponible et déjà payée.
- Réaliser un gain économique en valorisant un rejet en externe.
- Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre en utilisant une énergie de récupération à contenu CO_2 nul et réduire dans le même temps l'émission de polluants issus de sa combustion, s'il avait fallu la produire directement.
- Enrichir une stratégie RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises) avec des objectifs de valorisation de la chaleur fatale.

➤ Wilaya ou région :

- Créer une synergie économique et environnementale avec le tissu industriel. Synergie qui peut, par exemple s'inscrire dans un projet d'Écologie Industrielle et Territoriale.
- Répondre à un besoin en chaleur d'un bassin de population.
- Limiter les Gaz à Effet de Serre et contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique.

➤ Le pays :

- Réduire les importations d'énergie quand cela est nécessaire, diminuer la dépendance énergétique et améliorer la balance commerciale.
- Favoriser le développement industriel, par l'investissement dans des équipements de valorisation.
- Respecter les engagements environnementaux liés aux politiques de lutte contre le réchauffement climatique.

1.5 La valorisation de la Chaleur fatale : [8]

Les axes de valorisation de la chaleur fatale sont multiples et ont différentes motivations. Ils peuvent être :

1.5.1 Sous forme de chaleur :

- Pour répondre à des besoins de chaleur propres à l'entreprise (séchage sur d'autres lignes de procédés, préchauffage de l'air comburant, chauffage des locaux, etc.),
- Et/ou pour répondre à des besoins de chaleur d'autres entreprises situées à proximité,
- Et/ou pour alimenter un réseau de chaleur urbain.

1.5.2 Avec un changement de vecteur énergétique par la production d'électricité

- Pour répondre à des besoins électriques au sein même de l'entreprise, en autoconsommation,
- Et/ou pour répondre à des besoins électriques collectifs externes (production décentralisée d'électricité).

Ces deux formes de valorisation sont cohérentes et complémentaires car les niveaux de température sont différents pour une valorisation sous forme de chaleur et une valorisation par production d'électricité. Dès lors que la chaleur récupérée atteint un certain niveau de température (environ 150-200 °C), la production d'électricité est envisageable. La récupération de chaleur pour les réseaux de chaleur, elle, ne nécessite pas forcément de si hauts niveaux de température.

La minimisation et la récupération de la chaleur résiduelle constituent une occasion importante d'améliorer l'efficacité et de réduire les factures d'énergie. Cela peut également se traduire par une réduction des coûts d'entretien et une amélioration de la productivité de l'équipement, car l'équipement consommateur d'énergie peut être utilisé moins intensément. Il y a souvent de nombreuses possibilités dans les bâtiments et les usines plus anciens de mettre en œuvre des programmes de récupération de chaleur. L'énergie thermique de la chaleur résiduelle peut être réutilisée directement pour :

- préchauffage
- procédés de réfrigération
- amélioration de la qualité de la chaleur
- conversion en électricité.

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Jusqu'à 80 % de l'énergie perdue dans les processus de fabrication peut être récupérée à moindre coût. Cela signifie que la récupération de la chaleur résiduelle est de plus en plus reconnue comme une opportunité clé pour les entreprises d'améliorer leurs résultats tout en réduisant les émissions de carbone

1.6 Technologies de valorisation

➤ Collecte de la chaleur :

Par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur, la chaleur peut être transférée à d'autres fluides/procédés/stockages avec un changement possible du support énergétique [9] :

- échangeur liquide / liquide (plaques) ;
- échangeur gaz / gaz (plaques, tubes) ;
- échangeur gaz / liquide (à ailettes, caloduc).

La chaleur collectée peut alors être utilisée pour le chauffage d'autres flux sur site, le chauffage des locaux industriels, etc. [9]

Technologies associées est : échangeur rotatif, échangeur à spirale, échangeur à plaques, échangeur à plaques air/air, échangeur tubulaire, échangeur cyclonique Économiseur/condenseur, échangeur en plastique Boucle à eau glycol.

➤ Remontée du niveau thermique :

Selon les besoins du site industriel, le niveau de température de la chaleur collectée peut être relevé par l'intermédiaire de technologie type pompe à chaleur (électrique ou gaz). Les technologies type compression mécanique de vapeur et éjecto-compresseur permettent de récupérer la chaleur fatale contenue dans les vapeurs (buées) d'un procédé [10].

La Technologie associée: Pompe à chaleur ,Compression Mécanique de Vapeur (CMV) ou Recompression Mécanique de Vapeur , Éjecto-compresseur. [10]

➤ Abaissement du niveau thermique :

La chaleur fatale contenue dans un effluent peut également être valorisée pour produire du froid (positif ou négatif) par l'intermédiaire d'une machine à absorption (ou à adsorption), moyennant l'utilisation de fluides abaissant la température de l'effluent en absorbant sa chaleur.[10]. La technologie associée : Machine à absorption.

➤ Production d'électricité : [10]

La chaleur fatale peut également être valorisée pour produire de l'électricité (changement de vecteur énergétique) via des turbines ou des machines ORC (Organic Rankine Cycle). Les

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

machines ORC constituent la technologie la plus prometteuse pour valoriser les flux thermiques industriels dont la température est supérieure à 150 °C.

L'utilisation de fluides actifs (vapeur, par exemple) transforme cette chaleur stockée sous forme moléculaire en travail mécanique. Cela conduit également à un rejet de chaleur, mais à une température plus basse que celle initialement disponible. Le travail mécanique produit peut ensuite être utilisé ou converti en énergie électrique.

La production d'électricité à partir de chaleur perdue peut être aussi associée à une valorisation complémentaire de la chaleur résiduelle (chauffage des locaux à l'intérieur du site, etc.), et ainsi maximiser le rendement global. Technologie associée : Machine ORC.

➤ **Stockage :**

Selon la temporalité des sources et des besoins de chaleur, la chaleur fatale récupérée peut être stockée pour une utilisation ultérieure sur site. Le stockage peut être thermique (par chaleur sensible ou chaleur latente) ou thermochimique (énergie par sorption). [10]

Technologies associées : Stockage par chaleur sensible, Stockage par chaleur latente (matériaux à changement de phase) , Stockage thermochimique (sorption)

Le niveau de température à laquelle la chaleur est disponible dans un procédé considéré conditionne donc la méthode de valorisation à mettre en œuvre. Dans tous les cas, l'énergie peut être récupérée sous forme de chaleur ou de travail mécanique (qui peut éventuellement être transformé en électricité ou être utilisé pour rehausser le niveau de température d'une autre source de chaleur). [10]

1.7 Etat de l'art :

La chaleur fatale est un sujet abordé par de différentes approches par cette partie synthétise les différents travaux réalisés :

- ❖ **En 1986 :** ARCELORMITTAL Dunkerque vers le RDC de Dunkerque : Premier projet de récupération pour la valorisation de chaleur fatale avec environ 80 GWh/an de chaleur valorisée (65% des besoins du RDC). [11]
- ❖ **En 2011 :** ADEME, FEREST ENERGIES : Inventaire du gisement régional des énergies fatales perdues du Nord-Pas-de-Calais [11].
- ❖ **Le 04 janvier 2016:**Maxime Piton a fait une récupération de chaleur fatale avec une application sur les fours rotatifs , le but c'était de caractériser un échangeur de chaleur appliqué en paroi des fours rotatifs avec l'utilisation d'un modèle intégré est développé

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

.Les résultats sont sans équivoque dans la gamme de nombres de Reynolds imposés : la contribution du mouvement axial, surpasse le mouvement rotationnel turbulent. Une corrélation adimensionnelle basée sur le nombre de Nusselt est proposée afin d'estimer numériquement l'effet de l'échangeur sur les profils de température internes dans le four.[11]

- ❖ **En 1 mai 2017** : Samuel Gendebien et al et pour réduire la consommation d'énergie. Dans le secteur de l'aviation. Ils ont fabriqué et testé un prototype d'échange de récupération de gaz de combustion (gaz/eau ou gaz/pétrole) de but de récupérer et recycler la puissance produite par le moteur , par un échange placé dans la pile de gaz d'échappement. Et ils ont fait une comparaison des résultats numériques et empiriques est présentée [13].
- ❖ **En 29 juillet 2017** : Zélia Hampikian de but de Distribuer la chaleur fatale des entreprises avec la construction dynamique d'un réseau d'énergie décarbonnée, entre flux et infrastructure, elle vise à comprendre les conséquences de ce manque de contrôle sur la construction et le fonctionnement d'un réseau à travers l'analyse de deux études de cas françaises à Dunkerque et dans le Val d'Europe. Il montre que l'évolution temporelle du flux de chaleur et les projections que les acteurs en font conduisent les décisions prises concernant le réseau. Ainsi, le flux produit est mis au centre de l'évolution du réseau rationnelle et l'infrastructure est construite en conséquence pour le distribuer. En ce sens, le processus est inversé par rapport au rationnel classique de la construction de réseaux urbains. [14]
- ❖ **Le 08 novembre 2017** : MADOUNI Ouarrdia et OUDNI Louiza ont fait une étude de la faisabilité de récupérer les rejets thermiques de La centrale de Cap-Djinet, elles ont réalisé la modélisation et l'optimisation thermo-économique des installations de valorisation de rejets thermiques industriels à basse température utilisant un cycle de Rankine organique ORC (sous-critique). A l'aide d'un programme de calculs sur MATLAB couplé à REFPROP a été élaborer pour décrire l'évolution du fluide dans des cycles dans un diagramme thermodynamique T-S, et une étude paramétrique est effectué en fonction de la pression du gaz naturel pour l'expédier et en fonction de température de condensation de l'ORC. il fonctionne avec des énergies gratuites des rejets thermique à basse température, il est bien de citer que la puissance minimale produite est de 875.44kW. [15]
- ❖ **Le 05 septembre 2018** :Elliot Woolley et al ont fait Récupération de chaleur industrielle avec une approche systématique .Dans le cadre de récupération de la

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

chaleur résiduelle est élaboré pour méthodologie en quatre étapes pour évaluer les activités de production dans les installations, analyser la compatibilité de la chaleur résiduelle source(s) et puits(s) en termes d'équilibre exergique et de disponibilité temporelle, en choisissant la récupération de chaleur approprié et la technologies et d'aide à la décision fondées sur les retombées économiques. Les possibilités de récupération est démontré dans une étude de cas industrielle. L'applicabilité du application est discuté. [16]

- ❖ **En 2018** : Hussam Jouhara et al fait Technologies et applications de récupération de chaleur. pour les procédés industriels. En considérant les possibilités de récupération de chaleur pour l'énergie l'optimisation dans les industries de l'acier et du fer, de l'alimentation et de la céramique, les technologies couramment utilisées telles que les récupérateurs, les régénérateurs, échangeurs de chaleur à plaques et économiseurs et des unités telles que les chaudières à chaleur résiduelle et les bobines de fonctionnement (RAC). Les techniques sont considérées comme des contacts directs récupération de condensation, par contact indirect, condensation de la membrane de transport et utilisation des unités comme les pompes à chaleur, les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (GRHP), les systèmes de caloducs, les cycles organiques de Rankine, qui récupère et échange la chaleur résiduelle avec un contenu énergétique. En outre, l'utilisation de nouvelles technologies émergentes pour la conversion directe de la chaleur en énergie, telles que la conversion thermoélectrique, piézoélectrique, thermo-voltaïque (TPV) sont également explorées et la fonctionnalité de toutes les technologies et l'utilisation de chaque technique en ce qui concerne leurs avantages et les inconvénients sont évalués et décrits. [17]
- ❖ **En 12 novembre 2019** : Alexandre Leclercq a fait un formalisme générique pour la planification des systèmes énergétiques avec une application à la valorisation de la chaleur fatale à partir d'une approche de planification d'une chaîne logistique. Cette approche repose sur la formulation et la résolution d'un modèle de Programmation Non Linéaire Mixte (PNLM) Toutefois, pour faciliter le développement de ce modèle et son adaptation à différents types de chaîne de valorisation, une extension du formalisme ERTN ('Extended Resource Task Network') introduit dans des travaux précédents est proposée. Elle supposera que la conception de la chaîne logistique visant à valoriser la chaleur fatale a déjà été réalisée et qu'elle consiste à exploiter cette énergie pour subvenir à tout ou partie des besoins du réseau de chaleur urbain. [18]

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

- ❖ **Le 11 décembre 2019** : la récupération de la chaleur et les systèmes utiliser et la différence entre le cycle de kalina et le cycle de Rankine organique et les avantages et les inconvénients de chaque de ce cycles. Avec une étude sur les propriétés de mélange utilisé dans ce cycle ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) pour voire son rôle et ils ont fiat des études thermodynamique par le logiciel EES pour voire les meilleures conditions de fonctionnement du ce cycle. Ils ont présentés des différents courbes come des résultats : travail utile et le rendement de cycle par varier la température de la source chaude, et la fraction d'ammoniac plus la pression total afin de conclure ses influences.[2]
- ❖ **En 2020** : L'ADEME, CUD, GPMD, CCI Littoral Hauts-de-France, PÔLENERGIE, GREENFLEX, FEREST ENERGIES font une étude de faisabilité pour la valorisation externe de la chaleur fatale industrielle : extensions des réseaux de chaleur de la CUD. [11]
- ❖ **En 25 juin 2020** : Samuel Chiche a développé des méthodes pour l'évaluation du potentiel énergétique des sources urbains de la chaleur fatale (eaux usée, Datacenter, blanchisseries, entrepôts frigorifiques). Il a utilisé une méthode de simulation avec un outils quand l'appelle RECOV'Heat, pour les intégrés dans le réseau de chaleur. [19]
- ❖ **Le 30 janvier 2021** : Bin Xu et Xiaoya Li ont proposé pour la première fois une méthode d'apprentissage du renforcement sans modèle pour optimiser la puissance transitoire en ligne pour l'ORC-WHRet explique les avantages de Q-learning Pour quantifier l'optimisation de la puissance de la méthode proposée, la méthode Proper Integral-Derivative, les méthodes de programmation dynamique hors ligne et en ligne sont mises en œuvre. Les résultats ont montré que Q-learning a généré 22% d'énergie cumulée de plus que la méthode Proper-Integral Derivative générée. En outre, Q-learning produit 96,6% de l'énergie cumulée que le hors ligne.. Compte tenu de l'excellente performance de production de puissance, faible coût de calculrobustesse, la méthode Q-learning proposée a le potentiel d'améliorer la production d'énergie de l'ORC-WHRsystème avec différentes configurations .[20]
- ❖ **Le 28 mars 2021** : Regis OLIVES et Aubin TOUZO on fait Modélisation analytique d'un stockage thermocline pour la récupération de chaleur fatale ou pour centrale solaire a concentration. Ils ont considéré le stockage en chaleur sensible de type thermocline et présente une méthode de résolution basée sur la double transformée de Laplace permettant l'obtention de la solution analytique du modèle de Schumann, ils ont prleur modèle du stockage proposer baser sur des filtres RC places en série. Le stockage est ainsi divisé en sous parties .En appliquant la transformée inverse de Laplace, on obtient

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

une expression de la température du fluide au sein du stockage au cours du temps. Ce modèle simple est comparé aux résultats expérimentaux obtenus sur une installation de taille industrielle destinée à la récupération et la valorisation de chaleur fatale. Le but est tenir compte de l'influence de la température sur les propriétés du lit, ou encore des phénomènes de diffusion axiale. Cette nouvelle approche du stockage thermocline faciliterait son dimensionnement et permettrait de mener de façon rapide son optimisation et son pilotage en régime dynamique. L'intégration du stockage thermique à un réseau multi-énergie ou à une centrale solaire serait alors simplifiée. [21]

- ❖ **Le 12 Aout 2021** : Bin Hu et al ont fait une pompe à chaleur à compression à vapeur à échelle de dix mégawatts afin de limiter le réchauffement climatique de 1,5 °C avant 2050, comme une solution technique efficace pour la récupération de la chaleur des déchets thermiques. Ce nouveau type est un système appliqué pour récupérer la chaleur résiduelle d'une aciérie pour le chauffage urbain. Deux centrifuges compresseurs avec injection de vapeur et configuration du système connecté en parallèle à deux cycles sont adoptés pour plus grande capacité de chauffage. À partir de la simulation, le COP devrait être plus de 6 avec une hausse de température supérieure à 30 C. Pour valider les résultats du calcul, une échelle de 10 MW, (9,5 MW) pompe à chaleur centrifuge a été installée et testée dans l'usine sidérurgique d'Angang Lingshan en Chine. Les résultats montrant des avantages par rapport aux méthodes classiques de chauffage. Le PER de la pompe à chaleur à compression de mégawatts est aussi élevé que 2,53 et la période de récupération de ce système de récupération de la chaleur résiduelle est de 1,66 an.[22]
- ❖ **Le 10 janvier 2022** : Paul Christodoulides et al ont revu et révisé les technologies conventionnelles de WHR, leur utilisation dans tous les types d'industrie, leurs limites. Une attention particulière est accordée aux « nouvelles » technologies de économies d'énergie et de coûts. Enfin, un examen approfondi des études de cas sur les applications des technologies WHR est présenté. L'information présentée ici peut également être utilisée pour déterminer le rendement énergétique cible, ainsi que les coûts d'immobilisations et d'installation, pour l'attrait des technologies de WHR, conduisant à l'adoption généralisée par l'industrie. [23]
- ❖ **Le 28 janvier 2022** : Jun Lu et al Les possibilités de la récupération de la chaleur résiduelle à la fois dans les pays développés et en afin de déterminer les avantages possibles de la récupération de chaleur ainsi que de faire une enquête générale développement des technologies de récupération de chaleur à l'échelle mondiale.

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Recherche sur les applications de récupération de chaleur industrielle dans les pays asiatiques et en la performance de cette ingénierie dans la pratique. [24]

- ❖ **Le 2 février 2022 :** S. BEGOT et al ont fait Conception et modélisation d'une micromachine Stirling comme solutions de production d'énergie. L'utilisation d'un moteur Stirling fabrique en micro-technologie et fonctionnant en récupération de chaleur à basse température. Pour cela, une adaptation des techniques et concepts utilisés pour les machines macroscopiques est nécessaire. A partir de cette étude, un concept de base de machine de type Alpha de puissance 2 MW est proposé grâce à une modélisation adiabatique du moteur. Un premier dimensionnement destiné à alimenter des objets de faible puissance a été présenté. Les performances obtenues de la machine selon la fréquence montrent que la fréquence optimale de fonctionnement est de l'ordre de 150 Hz soit une augmentation relativement faible par rapport à la fréquence optimale observée en machine macroscopique. La longueur du régénérateur a une forte influence sur les performances de la machine.[25]
- ❖ **Le 01 mai 2022 :** Bin Huang et Zu-Guo Shen ont Évalué les performances des générateurs thermoélectriques annulaires pour récupération de la chaleur des gaz d'échappement des automobiles. A la base d'un modèle théorique construit, une analyse sur des AEATEGs ont été effectués. Une méthode à éléments finis a été adopté pour La comparaison avec les plaques plates couramment utilisées, et les influences de l'écoulement et des paramètres de fonctionnement ont été analysés .Enfin, l'insertion d'un cylindre creux dans l'échangeur de chaleur d'échappement, a été proposé à améliorer le rendement et son efficacité a été évaluée. Les conclusions suivantes sont tirées:
 - La puissance et l'efficacité nettes des AEATEGs sont en moyenne de 1,1 % plus élevé par rapport à la plaque plate couramment utilisée.
 - Même performance est partagée par deux flux dispositions. Depuis la distribution de la température TEG différence est plus uniforme, résultant en une plus petite thermique stress dans les AEATEGs , le flux de contre-courant est recommandé.
 - La chute de pression locale est une fois plus importante que la chute de pression Moodytype. Pour réduire l'effet sur le rendement du moteur et améliorer le rendement de l'AEATEG, mesures visant à : diminution de la chute de pression locale, comme la conception rationalisée sur les échangeurs de chaleur d'échappement méritent d'être pris en considération. [26]

1.8 Conclusion

La récupération de cette chaleur est donc devenue une nécessité pour le secteur industriel. Cette valorisation peut toucher les trois secteurs (le transport, l'habitat et l'industrie). Dans ce travail on s'intéresse au le côté industriel en Algérie. Ce travail rentre dans le cadre d'une étude d'implémentation de la récupération de la chaleur fatale (WasteHeatRecovery WHR) pour la société BIBILA à Blida dans le but de réduire la consommation énergétique, améliorer l'efficacité énergétique intrinsèque d'une installation, et d'un intérêt économique dont dépend de prix de l'énergie et des coûts de l'installation de récupération.

CHAPITRE 2: GENERALITE SUR LES ECHANGEURS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la technologie qui s'adapte à la récupération de la chaleur fatale. Elle est basée essentiellement sur les échangeurs de chaleurs, notre projet s'est porté sur la valorisation énergétique de la chaleur fatale au niveau des industries locales. Notre cas d'étude est l'industrie BIBILA (Blida) qui est définie dans ce qui suit :

2.2 La Fiche Technique de la société d'étude [27]

Nom commercial: BIBILA

Nationalité : Algérienne

Forme juridique : Société à responsabilité limité

Régime juridique : Secteur privé

Domaine d'activité: [Agriculture et Agroalimentaire](#)

Siège social : Zone industrielle Ben Boulaid lots 14

Commune : Blida

Listes d'activités : Biscuiterie, pâtisserie et produits de régime.

2.3 La problématique

Lors de la visite effectuée au niveau de l'unité de production BIBILA (Biscuiterie....à Blida), l'équipe chargée de production nous a informé sur leurs besoins énergétique. Il s'agit d'assurer le chauffage de la matière 'chocolat' avec une masse donnée, à une température fixe et de manière continue. Ceci afin de garder le chocolat sous forme liquide pour assurer un processus ultérieur. D'habitude le chocolat est maintenu à la température voulue en utilisant une résistance électrique. Ce procédé est couteux en termes d'électricité en pièces de rechanges car les résistances ont une durée de vie très courte. Elles doivent être changées très fréquemment.

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

Par contre, l'équipe de production nous informe que leurs divers processus de fabrication dégagent énormément de chaleur sous différentes formes et à diverses températures. Dans certains points, la température ambiante peut atteindre des valeurs assez importante surtout en saison d'été où il est quasiment impossible aux ouvriers de travailler. Il est alors nécessaire de rafraichir

Ils existent divers points de pertes d'énergie à travers l'usine. Nous constatons lors de notre visite, qu'ils existent :

- Trois cheminées qui dégagent des gaz de combustion de fours
- L'eau de nettoyage des plateaux de cuissons sort à près de 60°C.
- La température dégagée par les fours à l'intérieur du hangar de production qui atteint 41°C

Après discussion avec l'équipe de production, sur la récupération de cette chaleur fatale qui est perdue dans l'atmosphère, la solution proposée est basée sur l'utilisation direct de la chaleur via) des échangeurs de chaleur car ils sont les plus adaptés à la problématique.

Pour cela, nous nous devons de définir et de connaitre technologiquement les échangeurs de chaleur.

2.4 Définition de l'échangeur de chaleur :

L'échangeur de chaleur, instrument clé du thermicien ou de l'énergéticien, permet de contrôler la température d'un système ou d'un produit en échangeant de la chaleur entre deux milieux. Ce principe est mis en œuvre dans de nombreuses applications courantes : chauffage, climatisation, réfrigération, refroidissement électronique, génie des procédés, stockage d'énergie ou production d'énergie mécanique (ou électrique) à partir d'énergie thermique. Dans l'échangeur classique, un fluide chaud transfère une partie de son enthalpie à un fluide froid. Ce type d'échangeur servira de base pour donner les définitions et les paramètres nécessaires à son dimensionnement, ainsi qu'à la compréhension des phénomènes. [28]

2.5 Principe général de fonctionnement d'échangeur [29]

Le principe général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique (voir figure2-1). Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi. Voir la figure suivante.

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

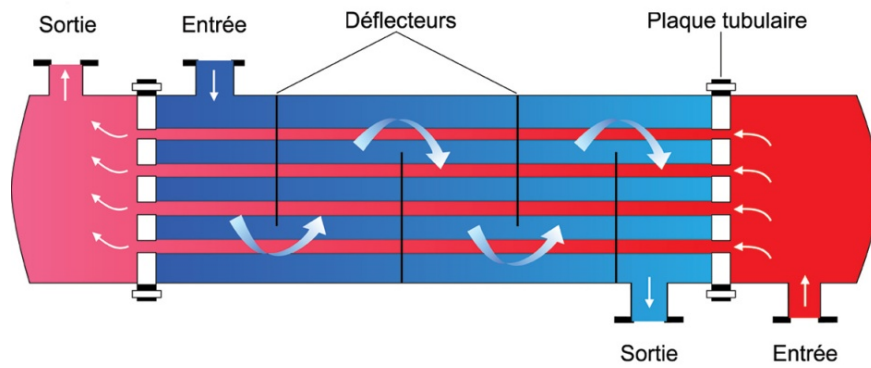


Figure 2-1 : le principe de fonctionnement d'un type d'échangeurs thermique. [29]

Le principal problème du thermicien, consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. La quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe. Il existe différents types d'échangeurs. [30]

2.6 Les Différents types d'échangeurs de chaleur :

On distingue deux grandes familles :

- ✓ La famille tubulaire.
- ✓ La famille a plaque.

2.6.1 La famille tubulaire

Les échangeurs tubulaires plus présents dans les installations thermiques industrielles. Il y représente 60%. [31]

Ils sont composés des faisceaux de tubes disposés à l'intérieur d'une enveloppe qu'on appelle la « calandre ». Le plus fréquemment ces tubes sont disposés à l'horizontal. L'objectif principal de cet échangeur est la récupération de chaleur sur liquides ou gaz. On distingue, le plus souvent, trois catégories :

- **L'échangeur monotube** : un tube ayant généralement la forme d'un serpentín est lacé à l'intérieur d'un réservoir (Figure 2-2). [31]



Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

Figure 2-2 : un échangeur monotube. [31]

- **L'échangeur coaxial (ou « tube-in-tube »)** : deux tubes sont imbriqués l'un dans l'autre. En général, le fluide chaud ou à haute pression s'écoule dans le tube intérieur (Figure 2-3) [31]

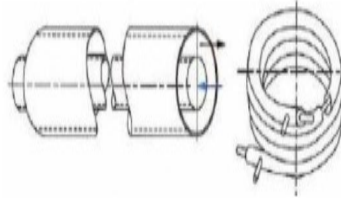


Figure 2-3: un échangeur coaxial. [31]

- **L'échangeur multi tubulaire**: il peut exister sous trois formes :
 - Échangeur à tubes séparés : à l'intérieur d'un gros tube sont placés plusieurs petits tubes, maintenus écartés par des entretoises (Figure 2-4) [31]

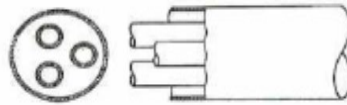


Figure 2-4: un échangeur à tubes séparés. [32]

- Échangeur à tubes à ailettes (batteries à ailettes) : Il est constitué d'un faisceau de tubes, répartis en nappes, dans lesquels circule un fluide ayant un bon coefficient d'échange (liquide ou fluide frigorigène). Le fluide extérieur étant un gaz, on place des ailettes sur la face externe des tubes pour en améliorer l'échange thermique (Figure 2-5) [32]

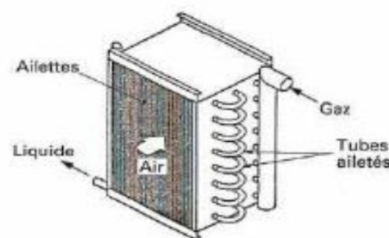


Figure 2-5: une batterie à ailettes . [31]

- Échangeur à tubes et calandre : ils sont constitués d'un faisceau de tubes placé dans une enveloppe (calandre). Les tubes sont maintenus par des plaques (perforées) qui

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

servent également de chicanes pour l'écoulement du fluide circulant côté calandre (Figure2-6) [32]

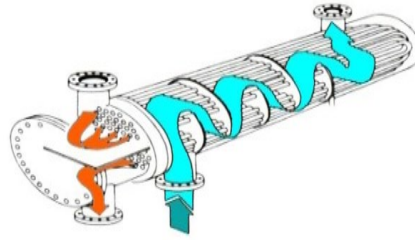


Figure 2-6 : un échangeur tubes et calandre. [32]

Les échangeurs tubulaires présentent [33] :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Particulièrement faciles à fabriquer.• Relativement bon marché.• Maintenance aisée.• Résiste aux fortes pressions.• Fiables et simples de conception.• Bon coefficient de transfert	<ul style="list-style-type: none">• Puissance Limitée.• Encombrement.

2.6.2 La famille à plaques :

De création plus récente que les échangeurs tubulaires, les échangeurs à plaques ont subi depuis leur création, il y a environ 60 ans, des améliorations substantielles. Il est constitué par un empilage de plaques écartées les unes des autres par des entretoises pour former un ensemble de conduits plats. Un fluide circule dans les conduits pairs, l'autre dans les conduits impairs selon le schéma ci-dessous. [34]

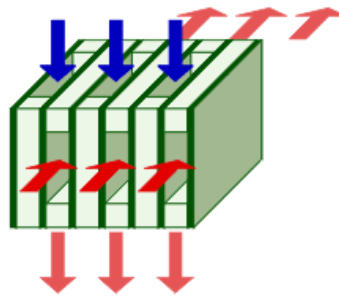


Figure 2-1 : Echangeur à plaque [35]

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

On distingue trois types :

❖ **Les échangeurs à plaques et joints** : les échangeurs à plaques connaissent un véritable développement depuis les années 1970 grâce à différents progrès technologiques.

- Ils sont souvent plus économiques que les échangeurs tubulaires
- ils permettent une efficacité énergétique et des gains économiques réels (Figure 2-8)

[36]

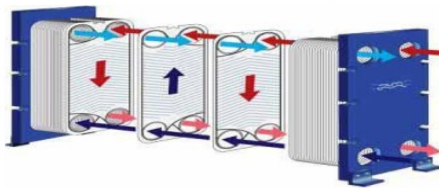


Figure 2-8: Echangeur à plaques et joints (ALFA LAVAL). [36]

❖ **Les échangeurs à plaques soudées** : On a constaté que :

- Les échangeurs de chaleur tubulaires sont puissants mais encombrants.
- Les échangeurs à plaques et joints sont compacts mais moins résistants à la pression.

Pour ces raisons et afin d'avoir un meilleur échangeur, les thermiciens ont associés les avantages des uns et des autres afin d'obtenir un échangeur de chaleur à plaques soudées.

Son fonctionnement est similaire à celui de l'échangeur thermique à plaques et joints (Figure 2-9) [36]



Figure 2-9: Echangeur à plaques soudées (ALFA LAVAL). [36]

✓ **Les échangeurs de chaleur à plaques brasées** : ils sont constitués d'un nombre variable de plaques corrugué (c'est-à-dire striées de manière transversale) de haute qualité. Celles-ci sont la plupart du temps en acier inoxydable ou en cuivre et une plaque sur deux est retournées à 180°. Chacun des deux fluides circule donc à contre-courant de part et d'autre des plaques d'échange. Cela permet entre autres de maximiser la surface d'échange utile (Figure 2-10)

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

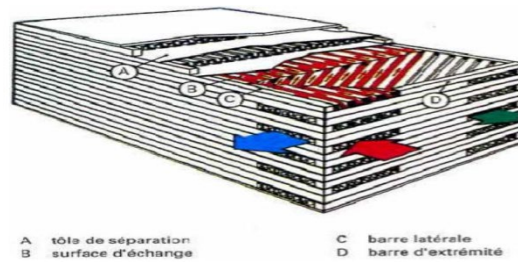


Figure 2-10: les composants et fonctionnement d'un échangeur à plaques brasées. [36]

Les échangeurs de chaleur à plaques brasées sont l'un des types d'échangeurs thermique les plus utilisés dans les industries du génie climatique. Il existe d'autres types tels que: [37]

- ✓ Les échangeurs à plaques spiralées.
- ✓ Les échangeurs à plaques à ailettes.
- ✓ Les échangeurs à plaques à micro canaux.
- ✓ Les échangeurs platulaires.
- ❖ Les avantages des échangeurs à plaques sont : [37]
 - Moins encombrant que les tubulaires.
 - Très bon transfert de chaleur.
 - Peu de perte thermique modulable.
- ❖ Les inconvénients des échangeurs à plaques sont: [37]
 - Faible écart de température possible.
 - Régulation difficile.
 - Risque de fuite.
 - Eviter l'usage de produit chimique.

Il existe d'autres types d'échangeurs de chaleur tels que :

- Echangeur Rotatif (Figure 2-11)
- Aeroréfrigérant(Figure 2-12)
- A Lit Fluidisé (Figure 2- 13)



Figure 2-11: échangeur rotatif .**Figure 2-12:** Aeroréfrigérant **Figure 2-2:** à lit fluidisé

2.7 Critères de classification des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs :

2.7.1 Type de contact

- ✓ **Échangeurs à contact direct** : le type le plus simple qui comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.
- ✓ **Échangeurs à contact indirect** : les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi (Figure 2-14)

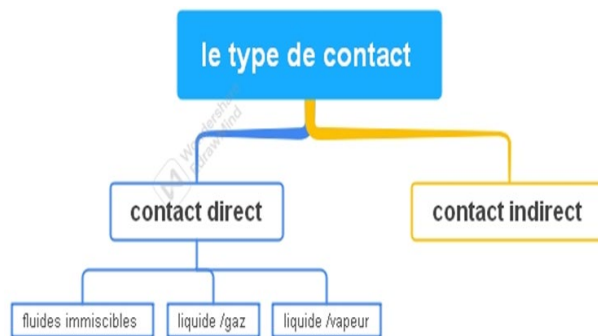


Figure 2-14 : classification des échangeurs de chaleur selon le type de contact. [38]

2.7.2 Classification suivant la disposition des écoulements :

Dans les échangeurs de chaleur à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories (Figure 2-15):

- ✓ Même sens « co-courants ».
- ✓ Sens contraire « contre-courant ».

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

✓ Ou bien les vecteurs vitesses sont perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fois de «courant croisés »

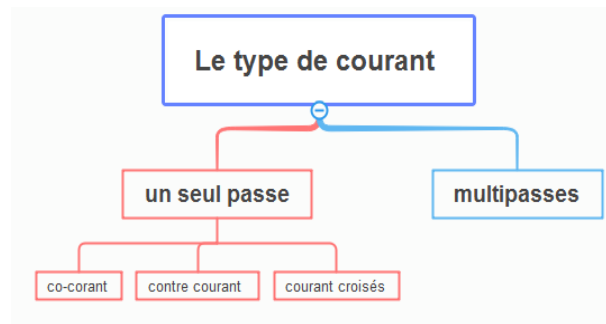


Figure 2-15: classification des échangeurs de chaleur selon la configuration de l'écoulement. [38]

2.7.3 Classification fonctionnel :

Les fluides peuvent circuler dans un échangeur de chaleur , avec ou sans changement de phase suivant le cas. On dit qu'on a un écoulement monophasique ou bien diphasique (Figure 2-16). On rencontre alors les différents cas suivants :

- ✓ Les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- ✓ Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.

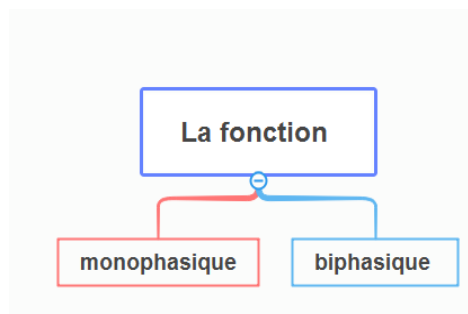


Figure 2-16: classification fonctionnelle des échangeurs. [37]

2.7.4 Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est le rapport de l'air de la surface d'échange au volume d'échangeur. Un échangeur soit considéré comme **compact** si sa compacité est supérieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Figure 2-17)

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

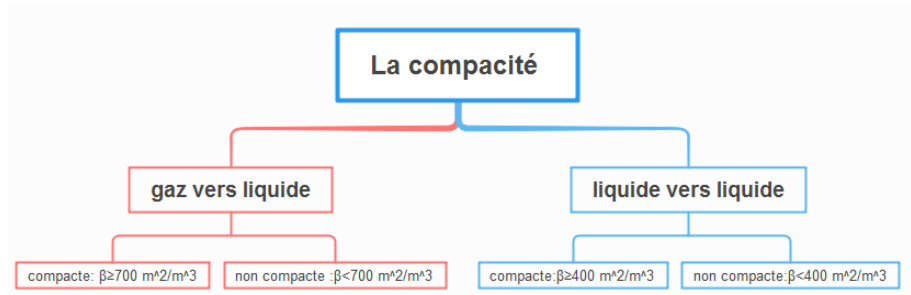


Figure 2-17: classification des échangeurs selon la compacité. [38]

2.7.5 Classification suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On a deux types de paroi (Figure 2-18) :

- les échangeurs métalliques :
 - ✓ acier,
 - ✓ cuivre,
 - ✓ aluminium
 - ✓ ou matériaux spéciaux: superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- les échangeurs non métalliques (plastique, céramique, graphite, verre, etc).

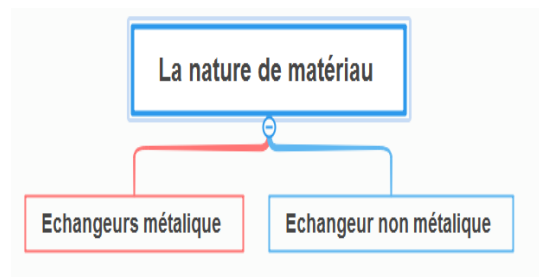


Figure 2-18: classification des échangeurs de chaleur selon la nature de matériau. [38]

2.7.6 Classification technologique

Les principaux types d'échangeurs sont les suivants (Figure 2-19) :

- ✓ **A tubes** : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- ✓ **A plaques** : à plaques brasées, soudées ou à plaques et joints.
- ✓ **Autres types** : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

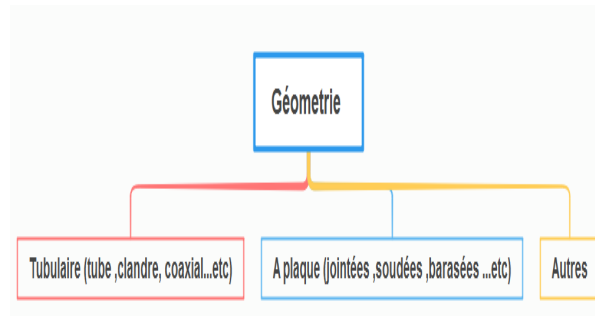


Figure2-19: classification technologique des échangeurs de chaleur. [38]

2.7.7 Classification selon le nombre des fluides

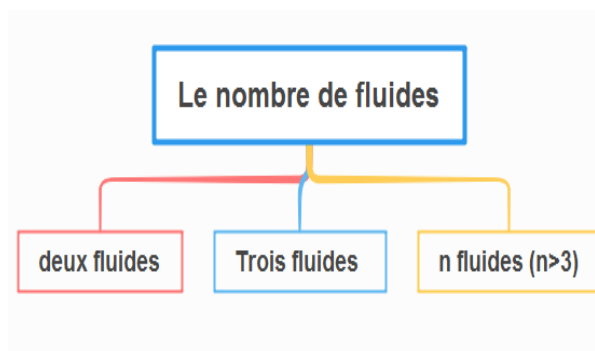


Figure 2-20: classification des échangeurs selon le nombre de fluides [38]

Les utilisateurs d'échangeur de chaleur rencontrent divers problèmes lors de son fonctionnement. Cela peut être : [38]

- ✓ Le phénomène d'encrassement qui présente un grand problème,
- ✓ La corrosion,
- ✓ Les vibrations,
- ✓ La tenue mécanique.

2.8 Définition de l'encrassement

L'encrassement c'est le dépôt de matériaux ou de substances indésirables sur une paroi, qui affecte une grande variété d'opérations industrielles. On a alors un fort gradient thermique près de cette paroi.

Ce phénomène est inévitable dans les installations industrielles et spécialement au niveau des échangeurs. Ses conséquences sont deux types d'effets. On observe généralement :

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

- Une augmentation des pertes de charge par frottement sur les parois puis une réduction de la section de passage du fluide dans l'appareil, pouvant aller jusqu'au bouchage partiel ou total de l'échangeur. Dans ce cas, on utilise le terme «colmatage».
- Une dégradation des échanges de chaleur car l'encrassement crée une résistance thermique additionnelle entre les fluides chaud et froid.

L'encrassement se répercute sur la rentabilité des installations par des coûts principalement liés aux pertes de production, à la surconsommation d'énergie et aux frais de nettoyage et de maintenance, et dans une moindre mesure aux surdimensionnements et aux ajouts d'équipements de nettoyage. [39]

2.8.1 Classification d'encrassement

On peut classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, les conditions d'utilisation de l'échangeur de chaleur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt. Nous adoptons, comme la plupart des auteurs, cette dernière méthode de classification. Six types différents d'encrassement peuvent alors être définis: [39]

- ❖ encrassement particulaire.
- ❖ Corrosion.
- ❖ entartrage.
- ❖ encrassement biologique.
- ❖ encrassement par réaction chimique.
- ❖ encrassement par solidification.

2.9 L'évaluation de performances thermiques d'un échangeur [40]

Pour l'étude d'un échangeur de chaleur, on aura besoin des connaissances de base acquises en:

- Thermique
- Mécanique des fluides.
- Résistance des matériaux (RDM)

Pour étudier les performances thermiques d'un échangeur, deux méthodes seront utilisées:

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

❖ Différence de Température Logarithmique Moyenne (ΔTLM) :

Cette méthode est particulièrement bien adaptée au mode dimensionnement. C'est de la détermination de la surface d'échange S connaissant la puissance échangée ϕ et les températures d'entrée et de sortie Des deux fluides.

❖ Nombre d'Unité de Transfert (NUT) :

C'est la méthode de l'efficacité (NUT), elle est bien adapté au mode évaluation, c'est pour la détermination des températures de sortie des fluides connaissant leurs températures d'entrée et la surface d'échange. [41]

Les deux méthodes peuvent être utilisées simultanément en particulier lorsqu'on désire varier certain grandeurs

Dans les calculs qui suivent, nous retenons les hypothèses suivantes: [41]

- Pas de pertes thermiques : la surface de séparation est la seule surface d'échange. Le flux est intégralement transmis entre les deux fluides.
- le problème est traité en régime permanent.
- Pas de changement de phase au cours du transfert.

2.9.1 Utilisation de la Méthode de la différence de température logarithmique moyenne ΔTLM

• Cas des échangeurs tubulaire à co-courant :

Les températures T_c et T_f sont les températures respectives des deux liquides chaud et froid sur l'élément de surface dS . L'expression du flux de chaleur fondamental $d\Phi$ échangé entre le liquide à travers cet élément dS s'écrit :

$$d\phi = U(T_c - T_f)dS \quad (2-1)$$

La distribution de la température des deux fluides est représentée sur la figure 2-21

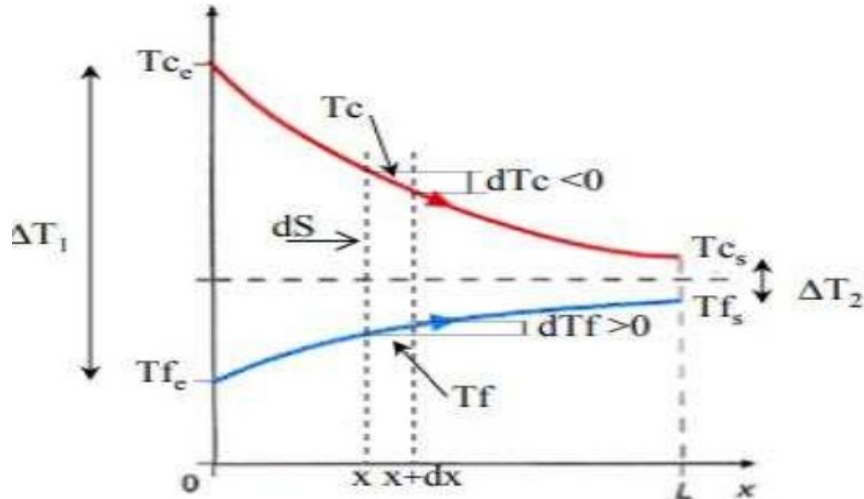


Figure 2-21: évolution des températures le long de l'échangeur de chaleur. [41]

Pour la détermination de flux thermique échangé, en partant de l'expression de flux élémentaire $d\Phi$ échangé entre les deux fluides à travers l'élément dS et qui s'écrit :

$$d\phi = -\dot{m}_c C_{pc} dT_c = \dot{m}_f C_{pf} dT_f \quad (2-2)$$

L'objectif est d'exprimer le flux total échangé entre les deux fluides en fonction du coefficient d'échange global et des températures d'entrée et de sortie de chaque fluide. On commence par exprimer dT_c et dT_f en fonction de $d\phi$, le calcul est le suivant:

$$dT_c = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c C_{pc}} \quad (3-3) \quad \text{et} \quad dT_f = \frac{d\phi}{\dot{m}_f C_{pf}} \quad (2-4)$$

$$dT_c - dT_f = d(T_c - T_f) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}}\right) d\phi \quad (2-5)$$

$$d(T_c - T_f) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}}\right) U(T_c - T_f) dS$$

$$\frac{d(T_c - T_f)}{T_c - T_f} = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}}\right) U dS \quad (2-6)$$

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

A cette étape, l'intégration de l'équation précédente en supposant que le coefficient d'échange

U est constant le long de l'échangeur, et avec les conditions aux limites ci-dessous :

✓ (x=0), entrée de l'échangeur: $T_c - T_f = T_{ce} - T_{fe}$

✓ (x=L), sortie de l'échangeur : $T_c - T_f = T_{cs} - T_{fs}$

$$\ln \frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}} = - \left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right) U.S \quad (2-7)$$

Or, le flux total échangé est exprimé aussi en fonction des températures d'entrée et de sortie des fluides:

$$\varphi = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f C_{pf} (T_{fe} - T_{fs}) \quad (3-8)$$

En remplaçant dans l'équation (2-7), et en fonction de Φ , et de la différence de la température selon l'équation (2-8), on obtient l'expression de flux (la puissance thermique totale) [40]

$$\varphi = U \frac{(T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})}} S \quad (2-9)$$

➤ **Cas des échangeurs à contre-courant :**

La distribution de la température est représentée sur la figure 2-22

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

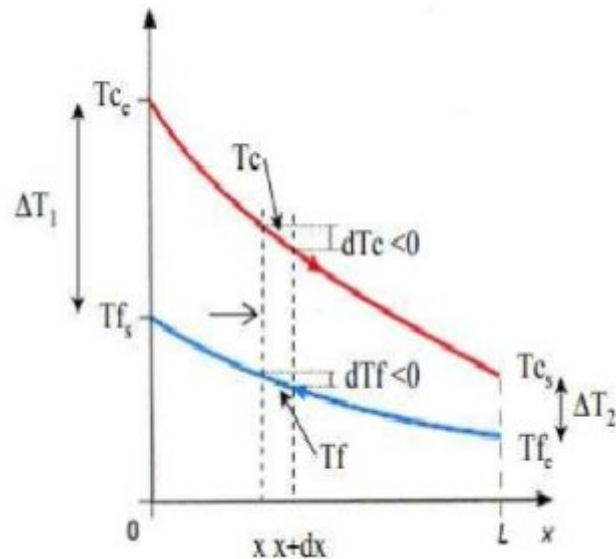


Figure 2-22: distribution de la température (échangeur contre courant). [40]

L'expression du flux élémentaire est :

$$d\varphi = -\dot{m}_c C_{pc} dT_c = -\dot{m}_c C_{pf} dT_f \quad (2-10)$$

Même démarche de calcul que précédemment .La puissance thermique totale échangée est :

$$\varphi = U \frac{(T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})}} S \quad (3-11)$$

La méthode (ΔTLM) qui consiste à exprimer le flux total échangé en fonction de coefficient d'échange global et de la surface d'échange et les températures en introduisant une nouvelle grandeur ΔT qui est définie par :

$$\Delta T = T_c - T_f$$

ΔT , est la différence entre le fluide chaud et le fluide froid dans une section donnée.

En choisissant les conditions aux limites suivantes :

- ✓ ($x=0$) entrée de l'échangeur : $\Delta T_1 = T_{c0} - T_{f0} = T_{ce} - T_{fs}$
- ✓ ($x=L$) sortie de l'échangeur : $\Delta T_2 = T_{cL} - T_{fL} = T_{cs} - T_{fc}$

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

$$\varphi = U \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} S = U \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} S \quad (2-12)$$

L'expression de flux:

$$\varphi = US\Delta T_{LM} \quad (2-13)$$

$$\text{Avec } \Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (2-14)$$

Où ΔT_{LM} Est la différence de température logarithmique moyenne « log mean temperature difference ». [40]

➤ Le coefficient d'échange global

Le flux de chaleur transféré dans un échangeur peut être déterminé qu'il est égal au flux de chaleur perdu par le fluide chaud et au flux de chaleur gagné par le fluide froid pendant leur traversée de l'échangeur [40]

$$\varphi = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f \cdot Cp_f \cdot (T_{fe} - T_{fs}) \quad (2-15)$$

$$\text{On peut l'écrire :} \quad \varphi = \dot{C}_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{C}_f \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (2-16)$$

Par ailleurs, le flux de chaleur φ transmis d'un fluide 1 à un fluide 2 à travers la paroi d'un tube cylindrique s'écrit (Figure2-23) :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\frac{1}{2\pi h_1 r_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi \lambda L} + \frac{1}{2\pi h_2 r_1 L}} \quad (2-17)$$

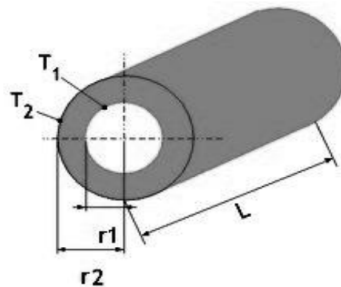


Figure 2-23 : schéma montre le flux de chaleur φ transmis dans un tube cylindrique. [40]

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

Dans les échangeurs de chaleur, on choisit de rapporter le flux de chaleur échangé à la surface.

$$S_2 = 2\pi.r_2.L \quad (2-18)$$

$$\varphi = h.S_2.\Delta T \quad (2-19)$$

Le coefficient global de transfert U d'un échangeur de chaleur s'écrit donc : [43]

$$U = \left(\frac{r_1}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda} + \frac{1}{h_2} + R_{en} \right)^{-1} \quad (2-20)$$

Ren: c'est une résistance thermique due à l'encrassement des surfaces d'échange dont il faut tenir compte après quelques mois de fonctionnement (entartrage, dépôts, corrosion,...). Le tableau (2-1) quelques valeurs pour les fluides les plus courants. [43]

Tableau 0-1 : Résistance thermique à l'encrassement des quelques fluides [40]

Fluide	Ren (W ⁻¹ .m ² .K)
Eau de mer (<50°C)	10 ⁻⁴
Eau de mer (>50°C)	2. 10 ⁻⁴
Eau traité pour les chaudières	2. 10 ⁻⁴
Eau déminéralisé	9.10 ⁻⁵
Vapeur d'eau	1 à 2.10 ⁻⁴
Fluides frigorigènes	2. 10 ⁻⁴
Air industriel	4. 10 ⁻⁴
Fioul	9. 10 ⁻⁴
Huile lubrifiante	2. 10 ⁻⁴

Mais, en réalité cette équation est plus complexe, puisque le coefficient d'échange convective h est en fonction de plusieurs paramètres (la géométrie, le profil, la vitesse, la température, l'écoulement,...etc.) et qui implique beaucoup d'expérience pour déterminer l'influence de chacune de ces paramètres. La complexité des phénomènes de convection rend

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

nécessaire l'utilisation des techniques de l'analyse adimensionnelle et de la similitude permettant de limiter le nombre des paramètres influents.

3.9.2 Utilisation de la méthode de Nombre d'Unité de Transfert (NUT) :

À partir de l'évolution de température, on constate que le fluide qui a le plus petit débit thermique unitaire donne (ΔT_{\max}) le changement de température le plus important. C'est de lui que dépend la quantité de chaleur maximale qui pourra être échangée, et l'on dit qu'il « commande le transfert ».

- ❖ **Le cas d'un échangeur à Co-courant :** l'écart maximum des températures dans l'appareil d'après la distribution de la température figure 2-23 est :

$$\Delta T_{\max} = T_{ce} - T_{fe} \quad (2-21)$$

- ❖ **Le cas de l'échangeur à contre-courant :** il y'a 2 cas à étudier, suivant le débit thermique de chaque fluide. Dans les deux cas (40)

$$\Delta T_{\max} = T_{ce} - T_{fe} \quad (2-22)$$

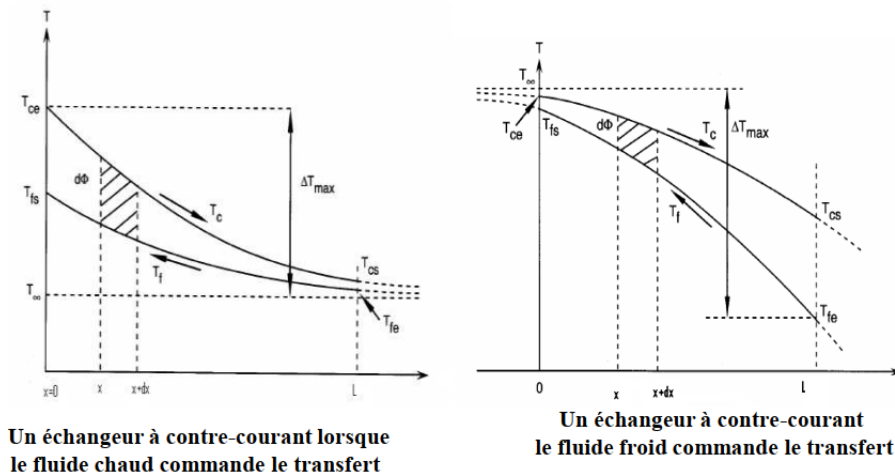


Figure 2-24:différentes représentation pour un échangeur contre-courant. [40]

- ❖ **Définition NUT:**

Le nombre d'unité de transfert noté NUT, c'est la méthode de nombre d'unité de transfert .elle permet un calcul direct de l'échangeur. C'est un rapport adimensionnel défini comme suit: [40]

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

$$NUT = \frac{U.S}{C_{\min}} \quad (2-23)$$

Avec $C_{\min} = (\dot{m} C_p)_{\min}$. (2-24)

➤ Efficacité d'un échangeur

L'efficacité d'un échangeur est le rapport de flux de chaleur réellement échangé au flux de chaleur maximum (idéal) théoriquement échangé dans les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit,...) dans l'échangeur.

$$\varepsilon = \frac{\varphi_{reel}}{\varphi_{\max}} \quad (2-25)$$

On introduit deux nouvelles grandeurs sans dimension :

$$\varepsilon_c = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} : \text{Efficacité relative coté fluide chaud.} \quad (2-26)$$

$$\varepsilon_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} : \text{Efficacité relative coté fluide froid.} \quad (2-27)$$

Il existe une relation simple entre ε_c et ε_f . Soit C le rapport des débits thermiques unitaires, qu'on appelle aussi facteur de déséquilibre et qui est défini :

$$C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2-28)$$

L'ensemble des cas possibles qu'on peut avoir (39) :

$$C_{\min} = C_c \text{ on obtient } \varepsilon = \varepsilon_c = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{1}{C} \varepsilon_f \quad \Longrightarrow \quad C = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_c} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{cs}} \quad (2-29)$$

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

$$C_{\min} = C_f \text{ on obtient } \varepsilon = \varepsilon_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{1}{C} \varepsilon_c \implies C = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_f} = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{fs} - T_{fe}}$$

(3-30)

Le flux thermique réel : $\varphi = \varepsilon \cdot \varphi_{\max}$.En remplaçant φ_{\max} en fonction de ΔT_{\max} \implies

$$\varphi = \varepsilon C_{\min} (T_{ce} - T_{fe}) . \quad (2-31)$$

➤ Détermination de l'expression de l'efficacité en fonction de nombre de NUT

L'objectif est de calculer l'efficacité pour chaque cas d'échangeur et l'exprimer en fonction de nombre de NUT. Un développement pour un cas particulier va être effectué et le reste des relations entre l'efficacité et le NUT est donnée dans le tableau (2-2)

❖ Cas de l'échangeur co-courant (parallel-flow) :

La température de sortie du fluide chaud ne peut pas atteindre celle d'entrée du fluide froid:

$$\varphi_{\text{réel}} = C_c (T_{ce} - T_{cs}) = C_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (3-32)$$

$$\text{Le flux max : } \varphi_{\max} = C_c (T_{ce} - T_{fe}) \quad (3-33)$$

$$\text{Efficacité de refroidissement : } \varepsilon = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{ce} - T_{fe})}$$

En partant par l'expression de la distribution de la température et en introduisant l'expression de l'efficacité, on arrive à exprimer l'efficacité en fonction de nombre de NUT :

$$\ln \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})} = -\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_c}\right)U \quad (2-34)$$

$$\frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})} = \exp\left(-\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_c}\right)U.S\right) \quad (2-35)$$

En utilisant l'expression de l'efficacité:

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

$$\varepsilon = \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})}$$

On obtient :

$$1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_c}\right)U.S\right) = 1 - \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})} \Rightarrow 1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_c}\right)U.S\right) = \frac{(T_{ce} - T_{cs}) + (T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})}$$

$$1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_c}\right)U.S\right) = \frac{(T_{ce} - T_{cs}) + (T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})} \Rightarrow$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_c}\right)U.S\right)}{1 + \frac{C_c}{C_f}}$$

En remplaçant le nombre NUT par son expression : $\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C)]}{1 + C}$ (2-36)

❖ Echangeur à contrecourant (counter-flow flow) :

Même démarche, pour un échangeur Co-courant. L'expression de l'efficacité en fonction de NUT est :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C)]}{1 - C \exp[-NUT(1 - C)]} \quad (2-37)$$

Pour les autres configurations, les corrélations donnant les expressions du nombre d'unité de transfert (NUT) en fonction de l'efficacité ou l'efficacité en fonction de NUT sont regroupées dans les tableaux suivant: [40]

➤ Relations entre efficacité et NUT (NTU)

On les trouvées brièvement dans le tableau 2-2 si dessous :

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

Tableau 2-2 : calcul de l'efficacité. [40]

Type de courant	Efficacité de l'échangeur
Courants parallèles et de même sens	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1+C)]}{1+C}$
Courants parallèles et de sens contraires	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1-C)]}{1 - C \exp[-NUT(1-C)]}$
Courants croisés : fluides non mixés (valeur approchée)	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{\frac{1}{\eta C} [\exp[-NUT(\eta C)] - 1]\right\}$ avec $\eta = NUT^{-0.22}$
Courants croisés : fluides mixés	$\varepsilon = NUT \left\{ \frac{NUT}{1 - \exp[-NUT]} + \frac{NUT(C)}{1 - \exp[-NUT(C)]} - 1 \right\}^{-1}$
Courants croisés : fluides C_{\min} non mixés Courants croisés : fluides C_{\max} non mixés	$\varepsilon = \frac{1}{C} \left\{ 1 - \exp[-C[1 - \exp(-NUT)]] \right\}$
Echangeur tubulaire (coque et tubes) : 1 passe coté coque et 2 passes coté tube	$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C + \frac{1 + \exp[-NUT(1+C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1+C^2)^{1/2}]} \left((1+C^2)^{1/2} \right) \right\}^{-1}$

➤ **Relations entre NUT (NTU) et efficacité :**

Selon le tableau 2-3 ci-dessous :

Tableau 0-3 les relations de la méthode de NUT. [40]

Type d'échangeur	La relation NTU
Double tube : flux parallèle	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1+C)]}{1+C}$

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

Contre-courant	$NTU = \frac{1}{C-1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C - 1} \right)$
Shell and tube : One-shellpass 2,4...tube passes	$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+C^2}} \ln \left(\frac{2/\varepsilon - 1 - C - \sqrt{1+C^2}}{2/\varepsilon - 1 - C + \sqrt{1+C^2}} \right)$
Courant croisé (un seul passe) Les deux fluides non-mixe	$NTU = -\ln \left(1 + \frac{\ln(1-\varepsilon C)}{C} \right)$
C_{\max} mixé C_{\min} non-mixe C_{\max} non-mixe C_{\min} mixé	$NTU = \frac{-\ln [C \ln(1-\varepsilon) + 1]}{C}$
Tous les échangeurs avec $C=0$	$NTU = -\ln(1-\varepsilon)$

La relation entre l'efficacité et le nombre d'unité de transfert peut être aussi présentée sous forme d'abaque :

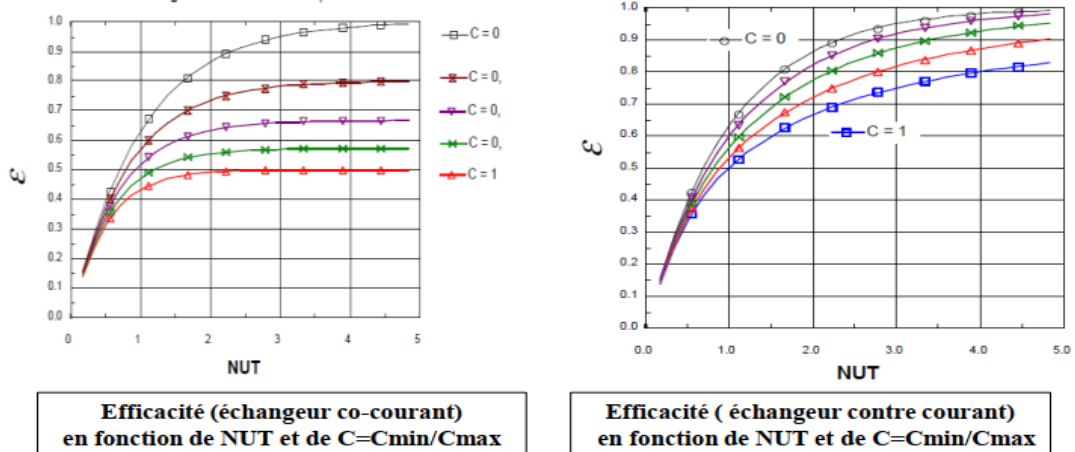


Figure 2-5 Efficacité des deux échangeurs avec différentes disposition du fluide en fonction de NUT [40]

Chapitre 2 : Généralité sur les échangeurs

2.10 Les étapes de dimensionnement des échangeurs

Pour dimensionner un échangeur on doit passer par plusieurs étapes (Figure2-26) qui sont les suivants :

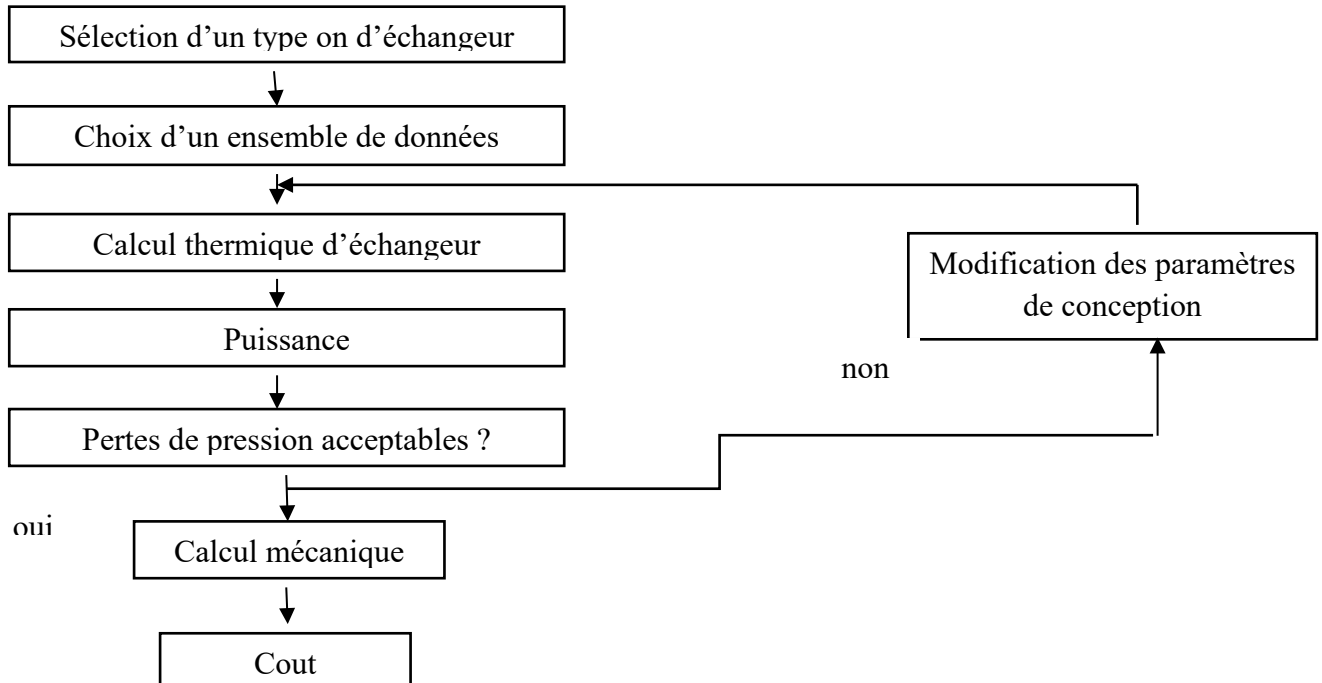


Figure 2-1: organigramme de dimensionnement d'un échangeur de chaleur. [44]

2.10.1 Le choix technologique

Le choix de la meilleure technologie est lié :

- ✓ Au calcul thermique
- ✓ A la nature des fluides.
- ✓ Au domaine d'application.
- ✓ Aux contraintes liées à l'encrassement et à la maintenance (nettoyage).

2.11 Conclusion

On conclut qu'avant de choisir un échangeur de chaleur pour une nouvelle installation de récupération de la chaleur fatale, il faut d'abord déterminé des critères de choix à déterminé selon le client pour notre cas l'industrie BIBILA).

CHAPITRE 3: METHODOLOGIE DE CHOIX ET DE L'IMPLEMENTATION DE L'INSTALLATION DE LA RECUPERATION DE LA CHALEUR FATALE

3.1 Introduction

La problématique de la société BIBILA est de remplacer l'actuel système de chauffage du chocolat basé sur des résistances électriques. Actuellement, l'unité de production de BIBILA possède un four avec une chambre de combustion. De cette dernière, sortent 88 tuyaux qui se regroupent dans un seul collecteur. Ce dernier est connecté à une cheminée qui est équipée avec un ventilateur qui permet d'évacuer les gaz de fumée (voir figure 3-1).

Dans le processus de confection des biscuits ou autres produits, la partie qui nous intéresse est le maintien du glaçage au chocolat sous forme liquide à une température fixe ($T= 42-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Actuellement, ceci est assuré par un système électrique précisément des résistances.

Le chocolat est stocké dans une cuve à double parois ayant une épaisseur de 50mm ; où circule de l'eau chauffée à une température de 45°C par des résistances électriques. A l'intérieur de la cuve se trouve un mélangeur qui assure l'homogénéité de la répartition de température du chocolat [45]. Ce système est très onéreuse car sa durée de vie est assez courte et est souvent assujetti à des pannes.

La solution que nous leur proposons est de remplacer le chauffage électrique par un système de récupération de la chaleur fatale dégagée par leurs différents processus.

Le présent travail a pour objectif de concevoir une installation de récupération de la chaleur fatale dégagée et de la réutiliser comme source d'énergie pour la convertir en énergie thermique afin d'assurer le chauffage et le maintien du chocolat à une température bien déterminée par l'industriel.

.Pour l'application on a pris la technologie des échangeurs afin d'accomplir leur besoin en chaleur, la forme voulue c'était l'énergie thermique .Pour le but d'éliminer leur ancien système électrique qui dépend des résistances qu'ils ont plus chers aussi ont des pannes inattendus.

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

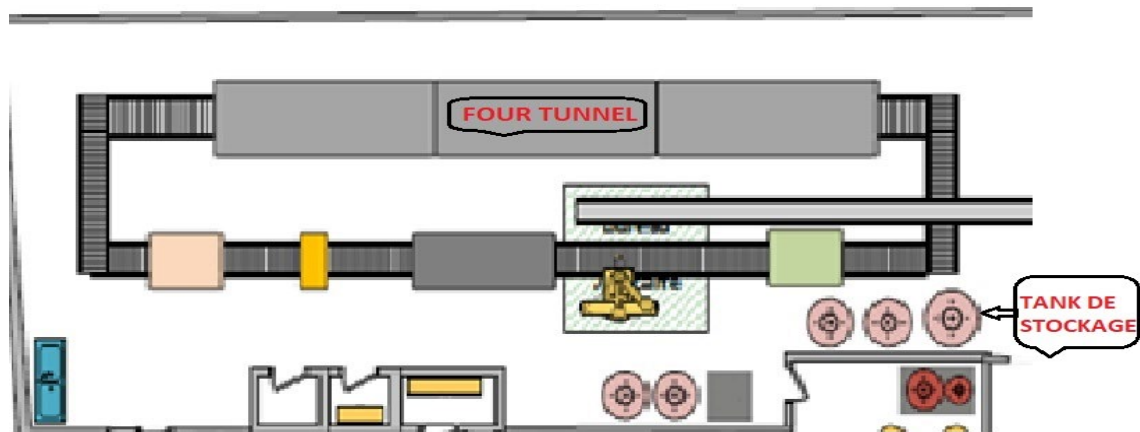


Figure 3-1 : processus de la société BIBILA. [45]

3.3 La source de chaleur fatale récupérable

Dans cette unité, la chambre de combustion du four dégage une grande quantité de chaleur sous forme de gaz de fumée. Ceux-ci sont collectés au niveau d'un collecteur central à une température de 152°C. Ces gaz se dégagent via trois cheminées à différentes températures. Elles ont un même diamètre de 250mm, une épaisseur de 2mm et sont isolées avec de la laine de verre. Chacune de ces cheminées est équipée par un ventilateur ayant les caractéristiques suivantes :

Vitesse de ventilateur donnée par constructeur est de 25m/s,

Un débit maximum de 8000m³/h

Une chaudière de température T=85°C de diamètre $\phi = 300mm$.

On constate qu'il existe deux types de fluides rejetés à la fin du cycle sous différentes formes à savoir :

- **Forme liquide :**

L'eau de nettoyage des plateaux de cuisson rejetée mal ou pas assez traitée à une température égale à 52°C avec un volume de V=60 L chaque t=7min.

- **Forme gazeuse :**

Les gaz de fumées des fours de cuisson sont rejetés via les trois cheminées décrites ci-dessus.

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

Les gaz de fumée de deux des cheminées ont une température de 135°C et atteignent les 145 °C dans la troisième. Ces gaz sont dégagés avec un débit de ventilation de 1.2m³/s à une hauteur de plus de 2.55 m. [45]

Dans cette étude, notre choix s'est porté sur la forme gazeuse. Les détails de l'installation sont dans ce qui suit.

3.4 Les installations proposées

Lors de mon stage de master au sein de l'industrie BIBILA, il me fut constaté que le meilleur moyen de récupérer la chaleur des gaz de fumées échappées (chaleur fatale) serait d'utiliser la technologie des échangeurs de chaleur. Cela permettra de chauffer la quantité d'eau nécessaire, qui sera injectée (au début de cycle) dans une nouvelle cuve de stockage de l'eau chaude juste à la sortie de l'échangeur. Cette eau chauffée sera injectée par la suite dans la cuve de stockage à double parois éliminant ainsi l'utilisation des résistances électriques. On propose trois modèles installés comme système de récupération de la chaleur fatale comme suit :

❖ Le 1^{er} modèle :

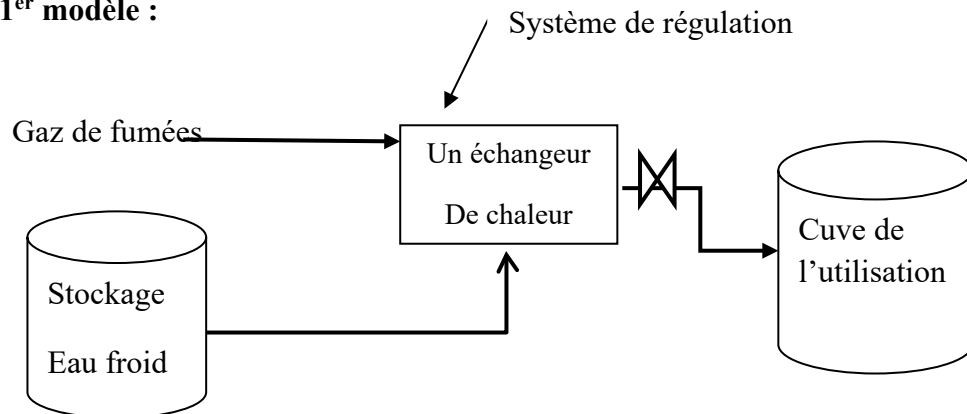


Figure 3-1 : le modèle proposé n°1.

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

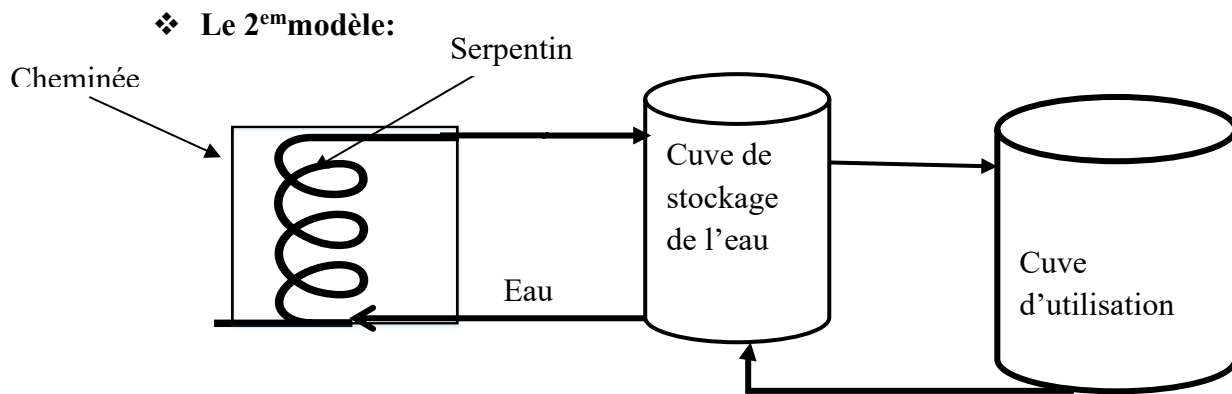


Figure 3-2 : le deuxième modèle proposé n°2.

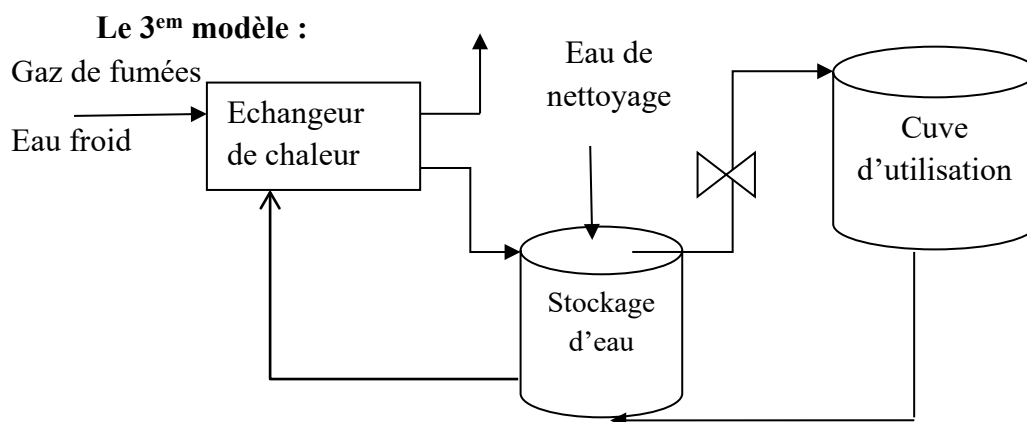


Figure 3-4: le modèle proposé n°3.

Parmi ces trois propositions, on a validé la troisième en accord avec l'industrie concernée.

3.5 L'installation validée

Afin de choisir parmi les trois modèles proposés, notre choix fut dicté par les différentes contraintes imposées par l'industriel et qui sont les suivantes :

- **L'emplacement** : dicté par le volume et/ou la surface qu'il occupera.
- **La distance** : i.e. où l'on va pouvoir placer la nouvelle cuve de stockage d'eau chaud (distanciation avec le reste de la chaîne de production).
- **La faisabilité** : assurer la sécurité de la chaîne de fabrication après avoir monté ce système de récupération de la chaleur fatale.

3.6 Description de la cuve de stockage du chocolat liquide

C'est une cuve de stockage en acier, à double paroi. Équipée par des résistances électriques à l'intérieur de ces parois et un mélangeur pour éviter la stratification de matériaux

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

à l'intérieur. Elle a une épaisseur égale à 50 mm, là où circule l'eau avec un débit de $V_{eau\ cir} = 0.45861074\ m^3$. Elle possède une capacité de 2 tonnes de la matière à chauffer du Chocolat dans notre cas (voir la figure suivante) :



Figure 3-1 la cuve réel de stockage de chocolat existante au niveau de BIBILA [45]

Dans notre cas l'industrie nous a exigé la température de l'eau qu'elle doit atteindre ($T_{eau} = 45^{\circ}C$).

3.7 Choix et description de la nouvelle cuve de stockage à installée :

La méthode de stockage par chaleur sensible consiste à stocker une énergie thermique par la variation de la température d'un matériau. L'eau a les valeurs de Chaleur spécifique et capacité thermique volumétrique les plus élevées, par rapport aux autres matériaux. En outre, l'eau est sans danger, disponible en abondance, relativement peu coûteuse et facile à manipuler et à stocker dans l'intervalle de température allant de 4 °C (à P=0,1 MPa) jusqu'à son point d'ébullition autour de 100 °C (à P=0,1 MPa).

De même, l'eau, en fluide secondaire, est parmi les plus utilisés aujourd'hui dans de nombreux systèmes d'énergie fonctionnant dans l'intervalle de température allant de 4 °C à 100 °C. Par conséquent, son choix en tant que milieu de stockage thermique est justifié.

Le stockage par chaleur sensible en utilisant de l'eau passe par deux phases :

- a) Phase de charge :

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

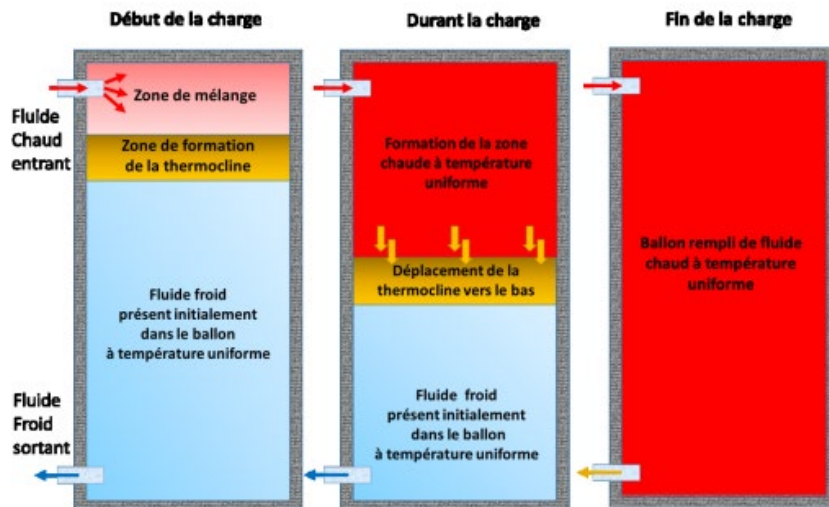


Figure 3-8 : La Phase de charge du ballon dans les applications de stockage de chaleur

b) Phase de décharge du ballon

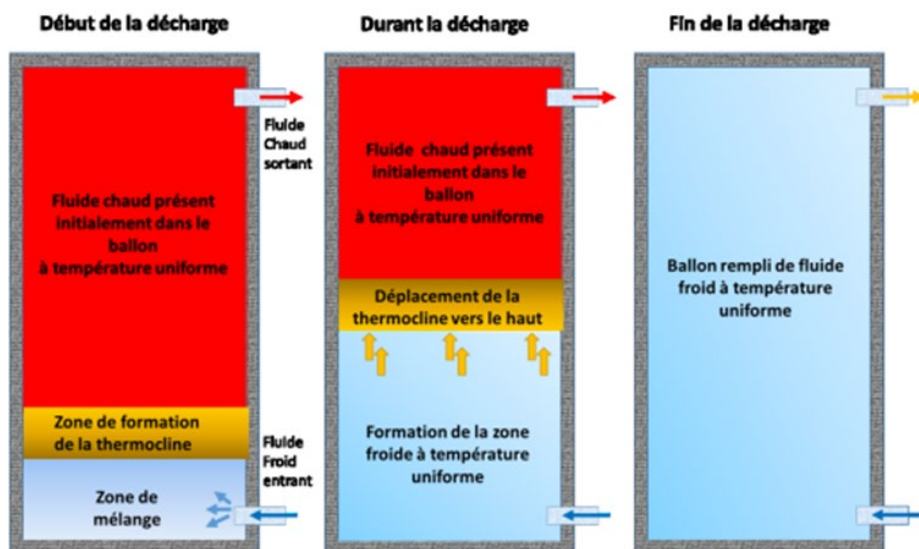


Figure 3-9 : Phase de décharge du ballon dans les applications de stockage de chaleur [49].

Après discussions sur le choix de la nouvelle cuve de stockage à installer de l'eau chauffée par son passage dans l'échangeur de chaleur, et en commun accord (prix, technologie, sécurité de l'installation, emplacement, taille...), le choix s'est porté sur une cuve de capacité égale à 1000L. La distance entre cette nouvelle cuve et le départ du cheminé sera de 2m60.

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

3.8 Le choix technologique de l'échangeur de chaleur pour la valorisation énergétique de la chaleur fatale

Après avoir défini la nouvelle cuve de stockage a installé notre intérêt est de faire de bon choix « Echangeur a installée » ; le problème crucial dans ce présent travail est de choisir le bon échangeur de chaleur (parmi une grande panoplie existant) pour valoriser la chaleur fatale perdue actuellement et cela grâce à une conversion thermique.

Pour validé le choix de l'échangeur, on est obligé de passer par des critères de choix afin de définir le modèle le plus compatible avec notre cas. Il faut tout d'abord connaitre certaines notions sur les échangeurs de chaleur qui sont développé dans ce qui suit:

3.8.1 La complexité de dimensionnement des échangeurs de chaleur : (46)

Parmi les facteurs qui influent sur la complexité du dimensionnement des échangeurs de chaleurs, on citera :

- La grande diversité des appareils (échangeurs tubulaires, à plaques, en graphite ...etc.)
- La variété des régimes d'écoulement : simple phase en régime turbulent ou laminaire, avec ou sans effet de convection naturelle, diphasique en évaporation ou en condensation, condensation avec ou sans incondensables...etc.
- Le nombre important des configurations d'écoulement, pouvant aller bien au-delà de deux fluides

On peut aborder le calcul d'un échangeur de deux façons différentes :

- Par un mode évaluation dans lequel la géométrie complète de l'échangeur est connue .On désire alors déterminer la puissance thermique échangée ainsi que les températures de sortie et les pertes de pression de chaque fluide .Dans ce mode de calcul, en plus de propriétés physiques des fluides, il convient de connaitre :
 - La géométrie de l'échangeur
 - Les configurations d'écoulements.
 - La nature et la disposition des matériaux utilisés.
 - Les débits des fluides.
 - La température d'entrée de chaque fluide
 - Les résistances d'encrassement.

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

- Par un mode dimensionnement dans lequel on connaît les services hydrauliques et thermiques demandés. On désire déterminer les caractéristiques géométriques de l'échangeur, en particulier les surfaces d'échange. dans ce mode de calcul, en plus de propriétés physiques des fluides, il convient de connaître :
- La puissance thermique échangée imposée
 - Les pertes de pressions maximales imposées
 - Les débits des fluides
 - Les températures d'entrée et de sortie de chaque fluide
 - Les résistances d'encrassement

Le travail de l'ingénieur est de choisir un type d'échangeur (plaques, tubes et calandre ;...), la configuration des écoulements, les matériaux, certaines caractéristiques des surfaces d'échange et déterminer la taille de l'échangeur pour remplir les services hydraulique et thermique désirés.

3.8.2 Les critères de choix de l'échangeur qui convient

On citera les critères suivants :

- Le type des fluides rejeté.
- La température de sortie de collecteur.
- Le niveau de température voulue pour l'utilisation (chocolat).
- La température ambiante la plus défavorable.
- La température de l'eau au niveau des parois de la cuve de stockage.
- La capacité (volume) de la cuve de stockage de la matière.

On constate que le choix est infini, il est alors nécessaire de suivre une méthode de choix optimale et fiable. Dans le cas du présent projet, notre intérêt s'est porté sur une méthode heuristique qui permet de déterminer le bon échangeur de chaleur.

3.9 Définition et fonctionnement des méthodes Heuristique [47]

Les méthodes d'optimisation classique ne peuvent être pas être utilisés dans notre cas car c'est un problème d'optimisation du choix multi contraintes et multi objectifs.

Notre choix s'est porté sur la méthode d'optimisation combinatoire appelée la méthode heuristique .C'est une méthode de résolution de problèmes qui ne repose pas sur l'examen

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

détaillé du dit problème. Cela consiste à travailler par approches successives. Par exemple, en faisant ressortir des similitudes avec des difficultés déjà rencontrées, afin de supprimer graduellement les alternatives et ne garder qu'un échantillon de solutions.

En optimisation combinatoire, une heuristique est un algorithme approché qui permet d'identifier en temps polynomial au moins une solution réalisable rapide, pas obligatoirement optimale. L'usage d'une heuristique est efficace pour calculer une solution approchée d'un problème et ainsi accélérer le processus de résolution exacte. Généralement les heuristiques sont conçues pour un problème particulier, ces des règles empiriques simples qui ne sont pas basées sur l'analyse scientifique. Elles sont basées sur l'expérience et les résultats déjà obtenus et sur l'analogie pour optimiser les recherches.

Les heuristiques peuvent être classées en deux catégories :

- Constructives qui génèrent des solutions à partir d'une solution initiale en essayant d'en ajouter petit à petit des éléments jusqu'à ce qu'une solution complète soit obtenue.
- Fouilles locales (Méthode de descente) qui démarrent avec une solution initialement complète (probablement moins intéressante), et de manière répétitive essaie d'améliorer cette solution en explorant son voisinage.

La Méthodes de recherche locale ou de descente :

Les méthodes de recherche locale, aussi appelées algorithmes de descente ou d'amélioration itérative, partent d'une solution initiale, et ont pour but de l'améliorer.

Le principe général de ces méthodes est le suivant :

- à partir d'une solution initiale x , dont on connaît la valeur de la fonction objective $f(x)$.
- on cherche la meilleure solution x_0 dans le voisinage de x .
- Si l'on ne parvient pas à améliorer x , alors on s'arrête, sinon on remplace x par x_0 , et on recommence.

Pour le choix optimal de l'échangeur de chaleur par la méthode heuristique, un organigramme est réalisé.

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

3.10 Méthodologie de résolution du problème

La diversité des formes d'énergie voulue d'après le client exige une technologie de récupération de la chaleur fatale se base sur les échangeurs de chaleurs. Ces derniers ayant de nombreuses caractéristiques (types, catégories, matériaux, géométries...etc.), il est alors très difficile pour le thermicien industriel de faire un choix technologique et/ ou un dimensionnement idoine. Cela se traduit par une recherche du choix optimale difficile à atteindre et qui prendrait un temps assez long (temps de réponse à l'industriel trop long) et coûterait trop cher. C'est pour cela qu'on a cherché à simplifier les étapes pour la récupération de la chaleur fatale avec une méthodologie du choix technologique approprié en réalisant un logiciel d'aide à la décision DSS (Décision Support System). Pour rendre cette solution applicable par les industriels concernés, il est nécessaire de lui associer une interface.

Celui-ci orientera ou guiderait l'ingénieur thermicien (l'utilisateur) afin qu'il trouve, à la fin de manipulation, un échangeur thermique optimale qui va assurer au maximum les besoins énergétiques du client par la récupération ou la valorisation énergétique de la chaleur fatale en utilisant une méthode d'optimisation heuristique.

La méthodologie de résolution à notre problématique est composée de trois parties :

- 1- Les critères de choix : on a classifié les échangeurs selon plusieurs critères selon leurs importances dans le choix technologique. On a caractérisé chaque échangeur par ses paramètres (pression, température, compacité...etc.)
- 2- La méthode d'optimisation utilisée est la méthode d'optimisation heuristique.
- 3- L'algorithme du DSS : dans cette partie, un algorithme est développé pour la conception du logiciel d'aide à la décision qui comporte tous les détails et les étapes à suivre.

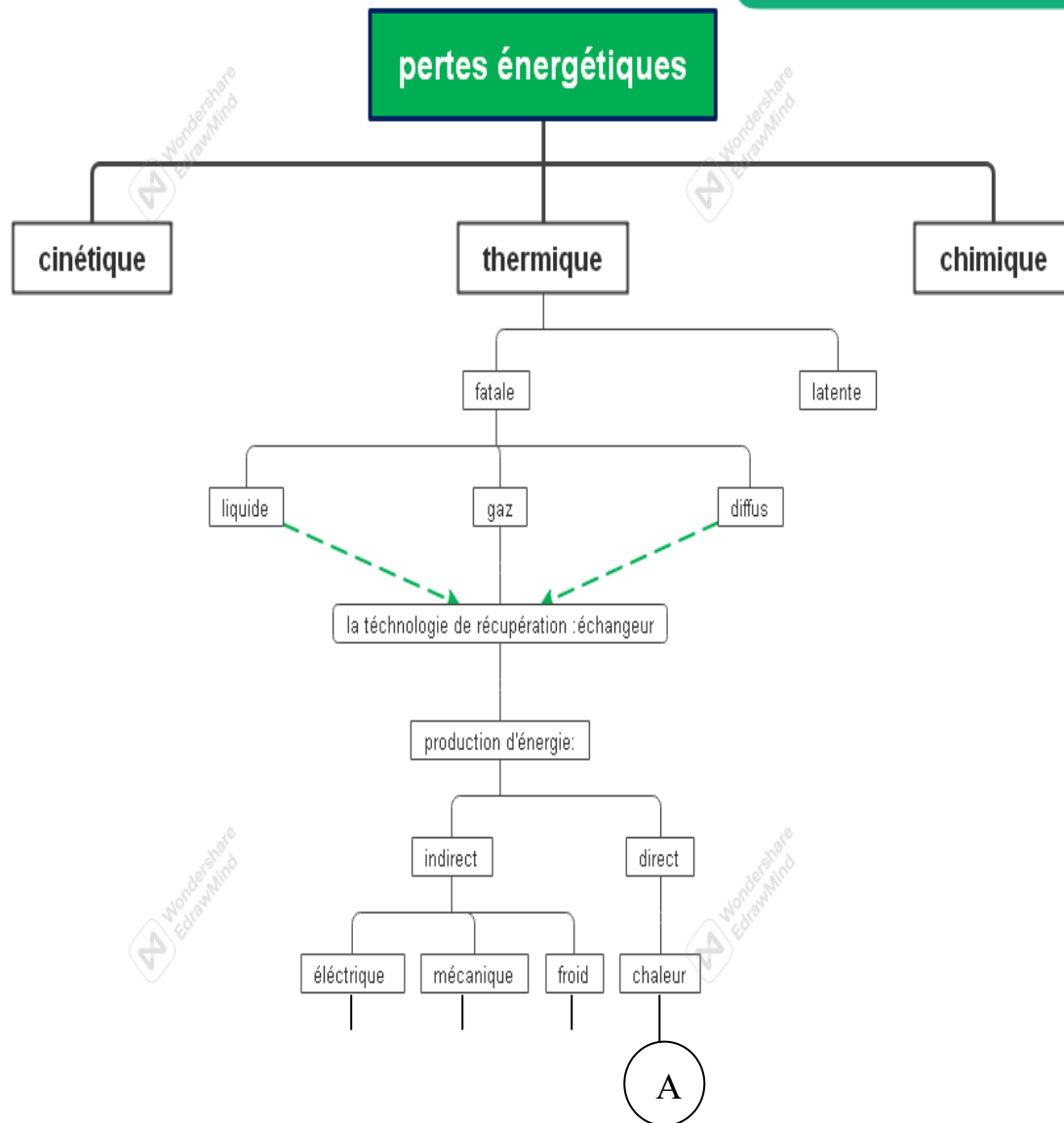
3.11 L'organigramme du choix de la valorisation énergétique de la chaleur fatale :

Pour le choix de l'échangeur de chaleur on suit les étapes suivantes selon l'organigramme ci dessous :

- a. L'organigramme de choix de la valorisation énergétique de la chaleur fatale :

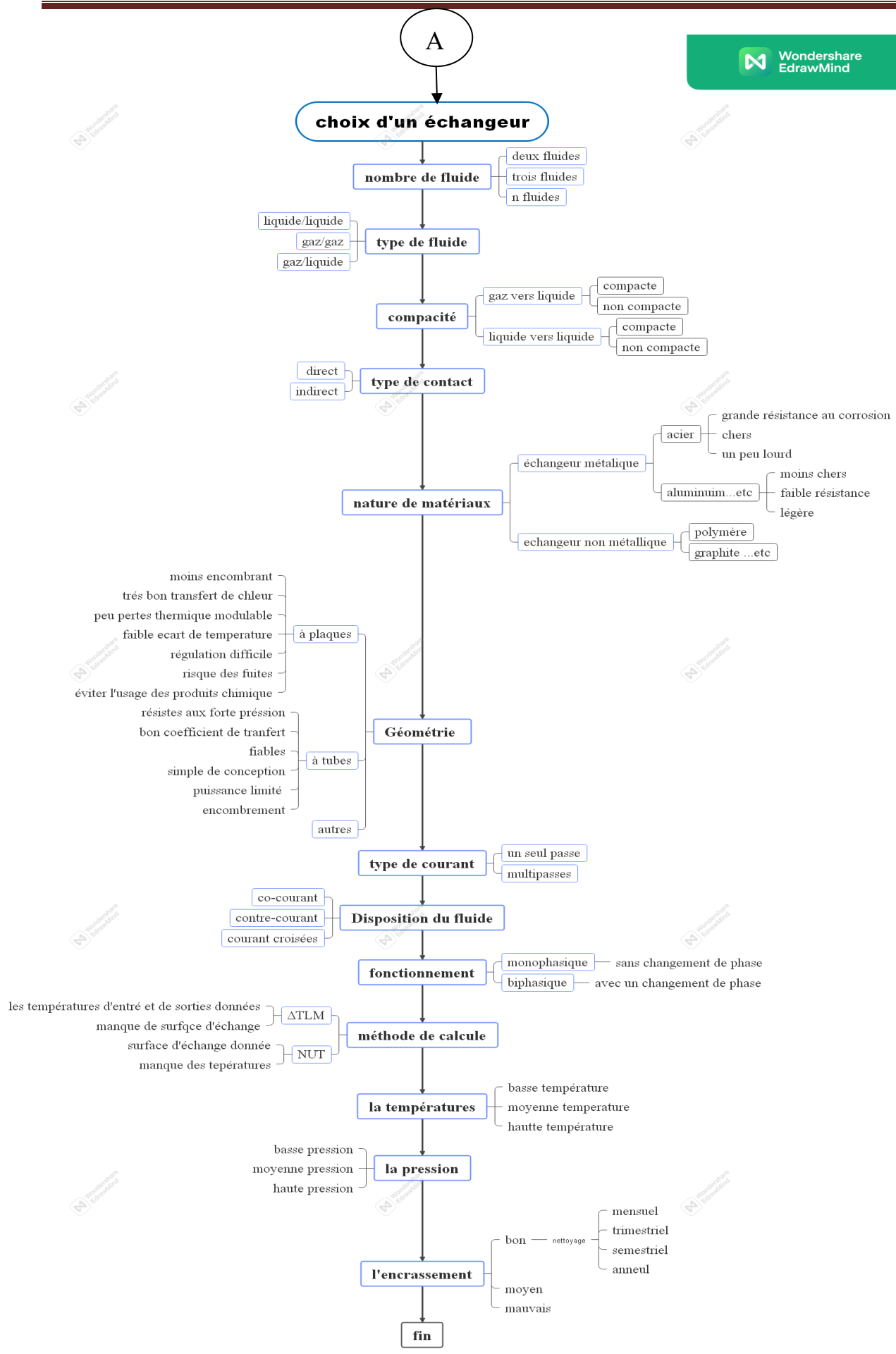
Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

Wondershare EdrawMind



b. Choix optimale de l'échangeur de chaleur :

Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale



Chapitre 3 : Méthodologie de choix de l'implantation de l'installation de la récupération de la chaleur fatale

3.12 Conclusion

Le but de ce chapitre est de trouver une méthode d'optimisation adéquate à notre problématique complexe. Un algorithme basé sur la méthode heuristique de descente est construit afin de développer un logiciel d'aide à la décision qui automatisera le choix technologique de la récupération et la valorisation énergétique de la chaleur fatale via un échangeur de chaleur .

Cela va nous permettre de déterminer les caractéristiques et le fournisseur de l'échangeur de chaleur à utiliser dans l'installation d'un système de récupération de chaleur fatale.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons en première étape le descriptif de l'interface du DSS en détail. En second étape, nous simulons plusieurs cas afin de répondre à la problématique posée par BIBILA.

4.2 La description et manipulation de DSS :

Ce logiciel est un outil qui permettra à l'utilisateur (et spécifiquement aux thermiciens) de faire le choix technologique optimale pour la récupération de la chaleur fatale et exactement choisir un échangeur de chaleur qui répondrait à ses objectifs et selon les données et contraintes du client.

4.2.1 La 1ere étape : page une

Cette partie représente la partie imposé par le client ou qu'il doit faire rentrer ses données disponible et la forme de récupération voulue.

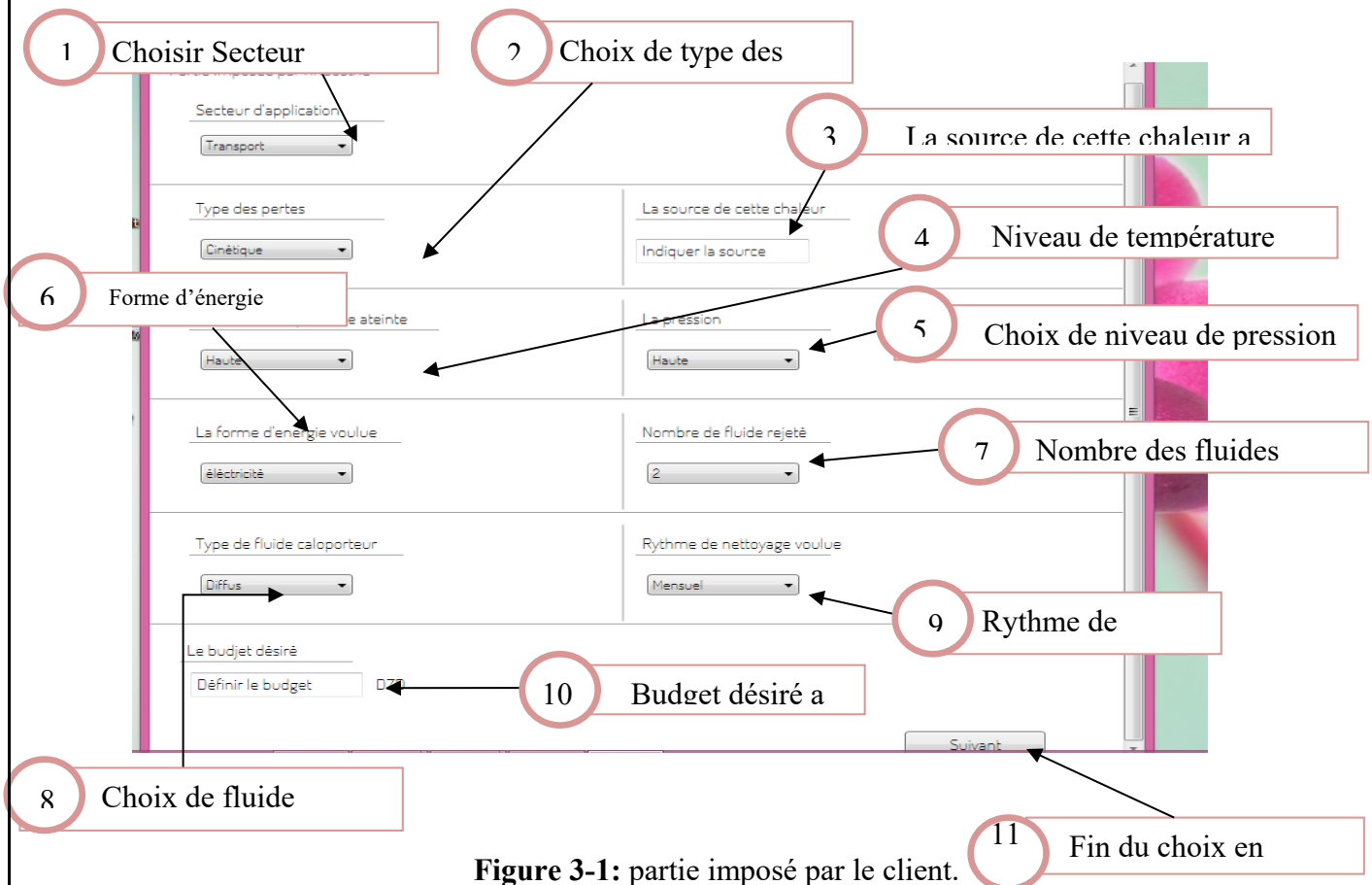


Figure 3-1: partie imposé par le client.

Chapitre 4 : Résultats et discussion



Figure 3-2:le secteur d'application

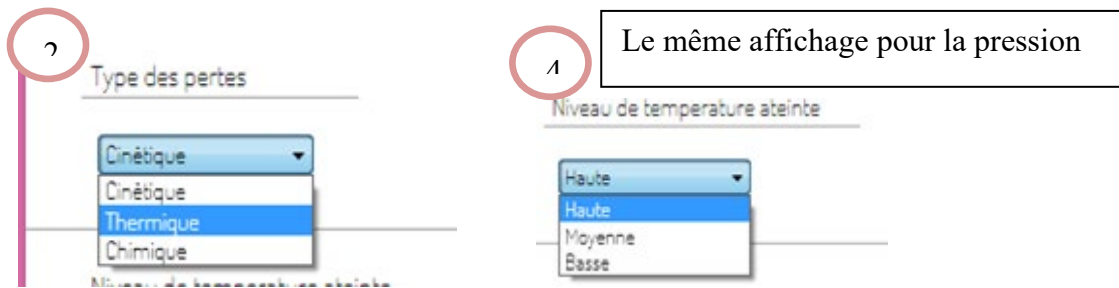


Figure3-3: type des pertes.

Figure 3-4:niveau de température.

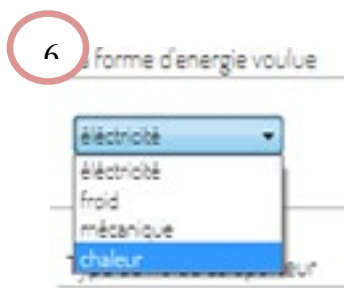


Figure3-5:la forme d'énergie voulue.

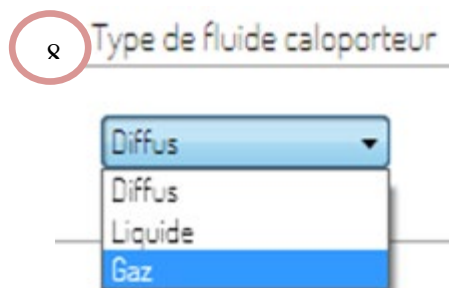


Figure3-6:Type de fluide caloporteur.

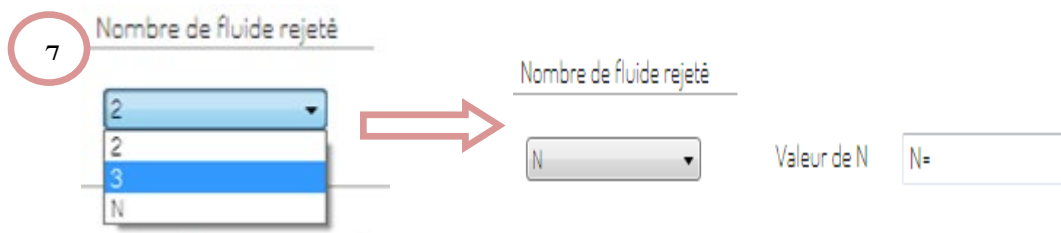
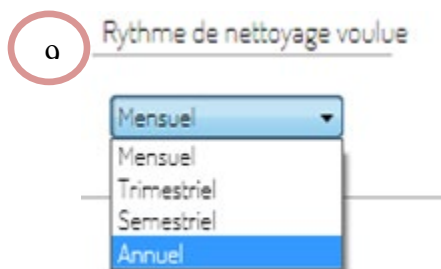


Figure3-7: nombre de fluide rejeté.



Chapitre 4 : Résultats et discussion

Figure3-8: le rythme de nettoyage.

4.2.2 La 2ème étape : deuxième page

Cette partie représente la partie de choix technologique par le thermicien ou qu'il doit faire rentrer ses exigences selon les contraintes imposées par le client.

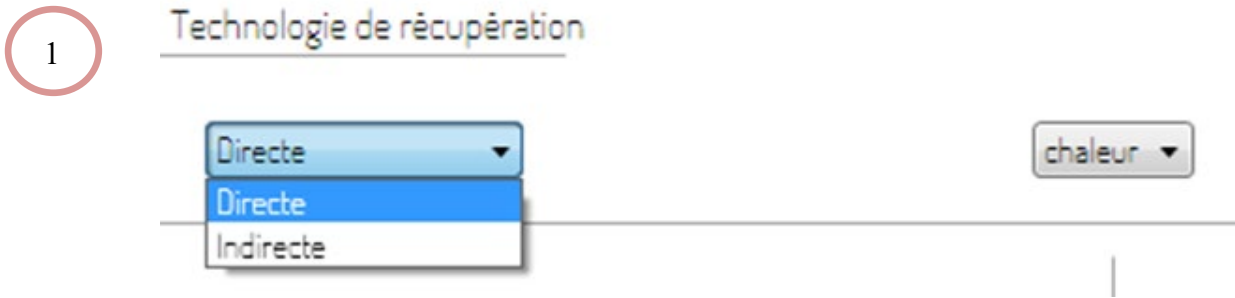
The image shows a software interface for selecting heat exchanger technology. It consists of several sections with dropdown menus and checkboxes. A red box highlights the entire interface, and a red circle labeled 'Heln' is placed in the center. Numbered callouts (1-9) point to various options:

- 1: Choix de la technologie puis (Technology of recuperation: Directe, chaleur)
- 2: Choix de nombre de fluide et (Number of fluids used: 2)
- 3: Type de contact puis spécifié (Type of contact: Directe, fluides immiscibles)
- 4: Choix de compacité puis (Compactness: gaz vers liquide, compacte B>700 m2/m3)
- 5: Nature de matériaux puis (Nature of materials: métallique, cuivre)
- 6: Choix de type de (Type of flow: un seul pass)
- 7: Choix de géométrie puis (Geometry: à plaque, échangeur à plaques et joints)
- 8: Disposition de (Fluid arrangement: co-courant)
- 9: Choix de (Operation: monophasique)

At the bottom right, there is a section for 'Résistance d'encrassement' (Fouling resistance) with a dropdown 'Défini par l'utilisateur' and a text input 'Résistance' followed by 'x 10 (W-1.m2.K)'. A callout '1' points to this section with the text 'Choix de nature de fluide utilisé et affichage de sa valeur de résistance'.

Figure3-9: la partie du choix technologique.

- Les propositions qui vont apparaître pour chaque paramètre sont les suivantes:



Pour le second choix :



Figure3-10: la technologie de la récupération.

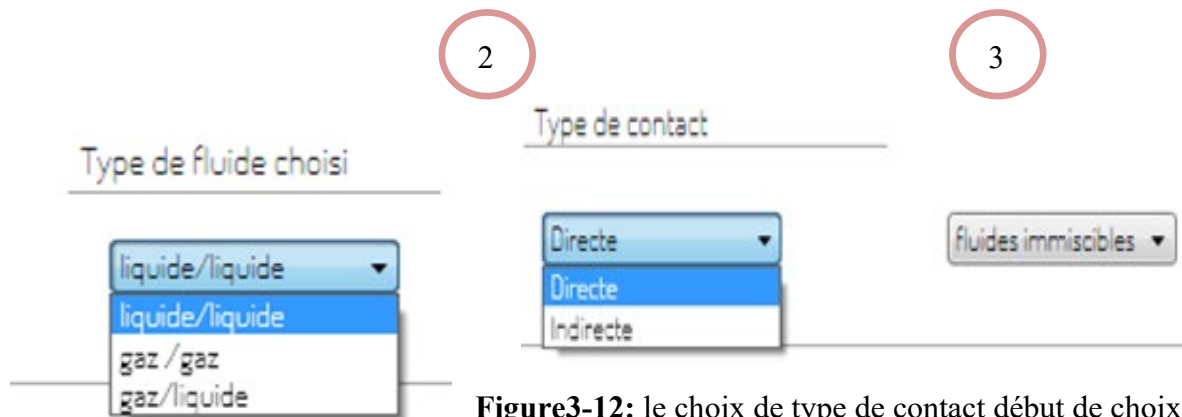
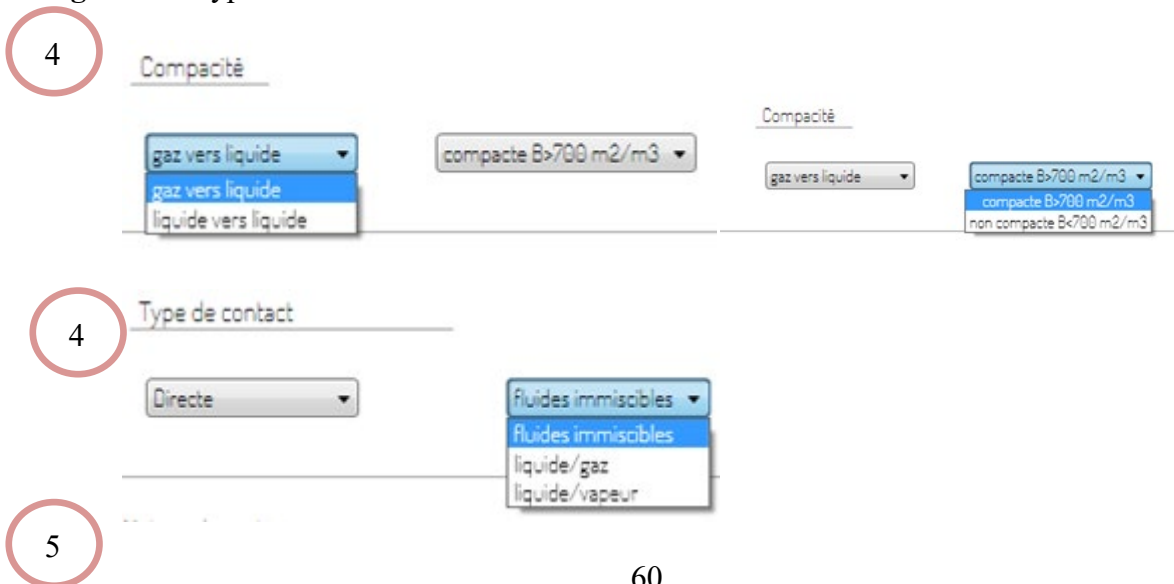


Figure3-12: le choix de type de contact début de choix.

Figure3-11: type de fluide choisi.



Chapitre 4 : Résultats et discussion



Exemples de help qui sera affiché au niveau du choix de ce paramètre :

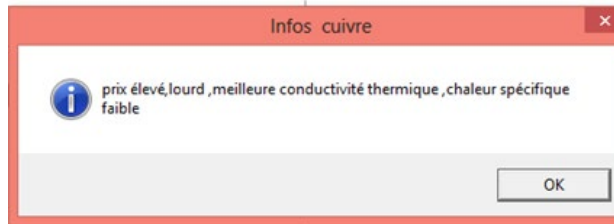


Figure 2: exemple d'un help qui va être affiché dans chaque matériaux différemment.



Figure3-14: proposition pour type de courant. **Figure3-15:** proposition de géométrie

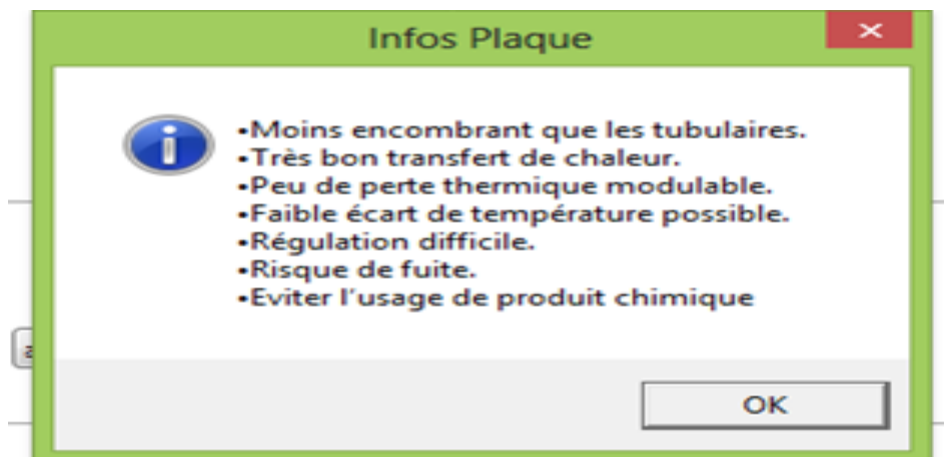


Figure3-16:Exemple des help qui sera affiché au sein du choix de géométrie.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

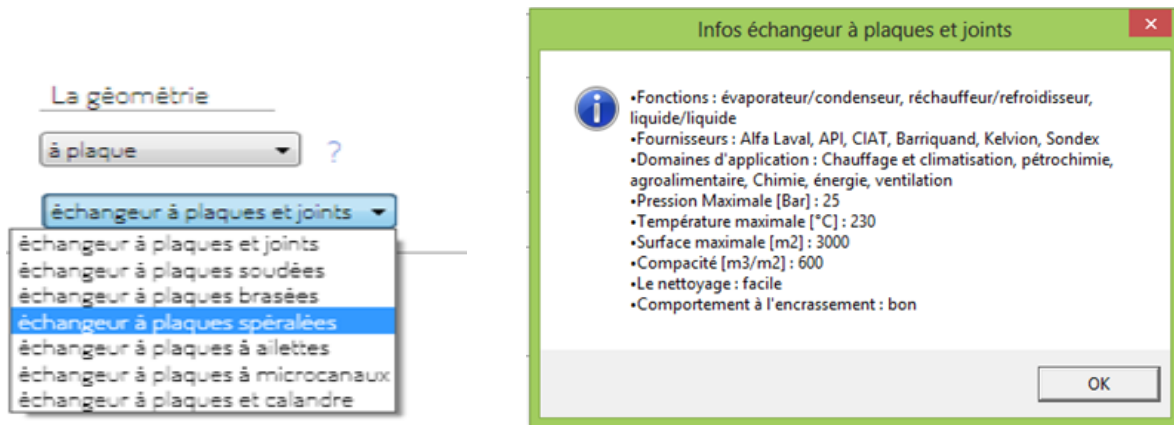


Figure3-17:les propositions des géométries et exemple d'un help des choix existants.

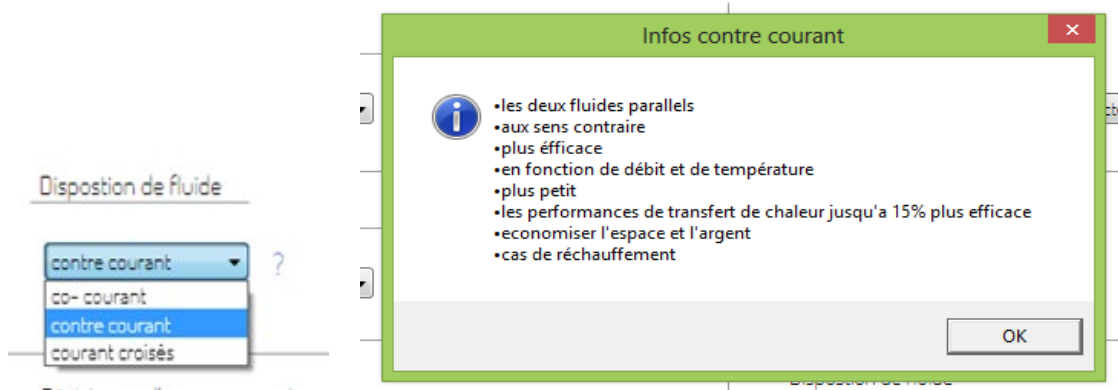


Figure3-18:les suggestions des dispositions des fluides et l'affichage un des help d'un choix.

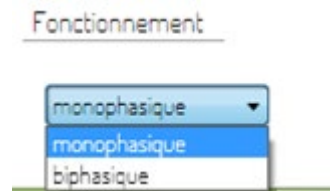


Figure3-19:les propositions de fonctionnement.

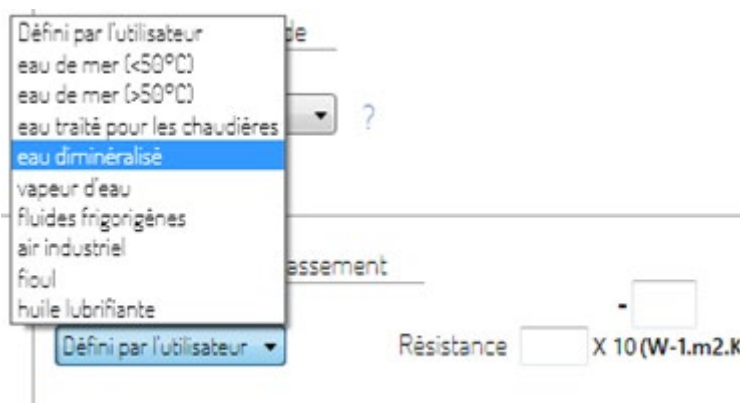


Figure3-20:les types des fluides proposés avec leur valeur de résistance d'encrassement.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.2.3 La 3^{ème} étape : page trois

C'est la partie où l'on va obtenir le choix optimale, c'est la partie d'affichage des critères qu'on a pourrait atteindre selon les informations imposées par le client. Tous les critères déjà choisis sont affichés avec des liens de divers fournisseurs. En cliquant sur ces liens, on peut alors trouver le bon fournisseur

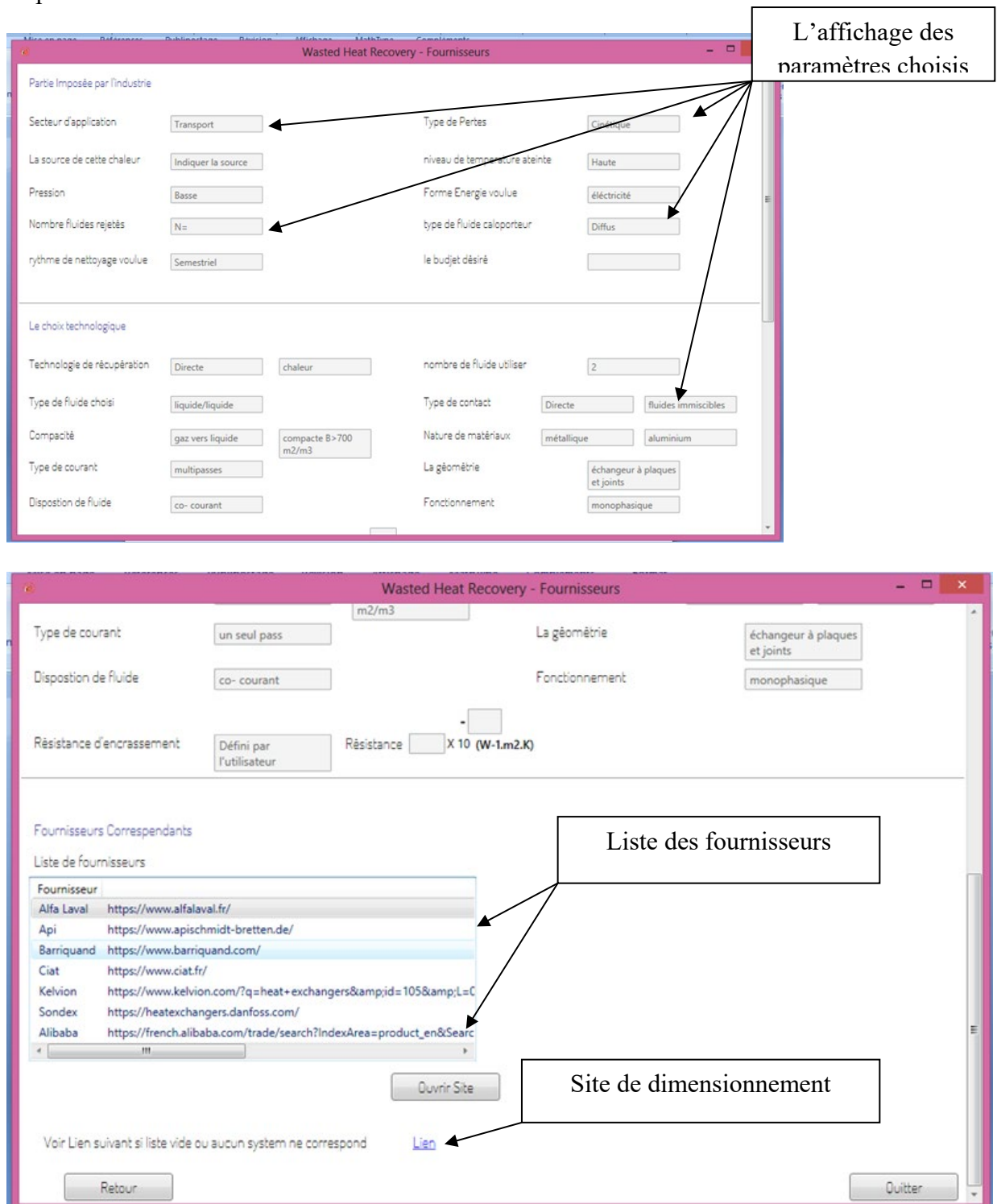


Figure3-21: les deux figures sont une page d'affichage du choix finale.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.3 Les résultats et discussions :

Pour répondre au problème posé par l'industrie Bibila, des simulations:

- Le type d'échangeur de chaleur.
- Les matériaux.
- Le type de courant.
- La dépositions des fluides.

Wasted Heat Recovery - Le choix technologique

Le choix technologique

Technologie de récupération

Directe chaleur

Nombre de fluide utiliser 2

Type de fluide choisi gaz/liquide

Type de contact Indirecte

Compacité gaz vers liquide compacte B>700 m2/m3

Nature de matériaux métallique ? cuivre ?

Type de courant un seul pass ?

La géométrie à plaque ? échangeur à plaques et joints ?

Disposition de fluide co-courant ?

Fonctionnement

Résistance d'encrassement

Figure4-22: les choix prête dans notre cas qu'ils sont relié avec la partie imposé par le client.

4.4 Les paramètres fixes:

Pour faire les simulations on a fixé ces paramètres si dessous qu'ils sont déjà exigé selon les informations imposé par le client. Ils ont été fixé comme les choix qui apparaissent dans la figure ci-dessus. Ces paramètres sont les suivantes :

- Le choix de technologie de récupération.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

- Le nombre de fluide.
- Les types des fluides.
- Le type de contact.
- La compacité.
- Le fonctionnement.
- La résistance d'encrassement.

4.4.1 La 1ere simulation :

Les résultats de cette simulation nous donnent trois types d'échangeurs de chaleur qui sont :

Tableau 4:les résultats atteindre concernant la variation de type del''échangeur à chaleur.

	serpentin	Echangeur a tube ailetées	Echangeur à plaque a ailettes
Type des échangeurs de chaleur	Fluide : Liquide /gaz Domaine : Agroalimentaire Pmax=25 Bar Tmax=200°C Compacité 200m ³ /m ² Nettoyage facile Encrassement bon	Fluide : Liquide /gaz Domaine : Chauffage et climatisation Pmax=100Bar Tmax=600°C Compacité 3000 m ³ /m ² Nettoyage : difficile Encrassement : moyen	Fluide : Liquide /gaz Domaine : Chauffage et climatisation P=120 T=650°C Compacité 6000 m ³ /m ² Nettoyage difficile Encrassement mauvais.

❖ Commentaires :

Dans ce cas, l'échangeur de chaleur le plus compatible avec les exigences du client est le type des échangeurs à serpentin car les deux autres ayant un nettoyage difficile, plus problème d'encrassement et ayant une large gamme pour la pression et la température.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.4.2 La 2 ème simulation :

Tableau 5:les résultats achevé selon la variation de matériaux.

	Cuivre	Acier	Inox	Aluminium
Matériaux Le type fixe serpentin	Prix élevé	Moins chers	Moins chers	Moins chers
	Lourd	Inoxydable	Moyenne	Plus légère
	Meilleure conductivité thermique.	Bonne résistance d'encrassement	conductivité thermique.	Bonne conductivité thermique
	Chaleur spécifique faible.			Efficace pour diffuser la chaleur

❖ Commentaires :

Dans ce cas-ci, les quatre types sont valables. C'est au client de faire son choix par rapport au prix.

4.4.3 La 3 ème simulation :

Tableau 6:les résultats sur le type de courant

	Un seul passe	Multi passes
Le type de courant	Ces échangeurs de chaleur ont des fluides qui ne passent qu'une seule fois.	Ces échangeurs de chaleur à plusieurs passages ont des fluides qui passent plus d'une fois grâce à l'utilisation de tubes en U et de chicanes

❖ Commentaires :

Dans notre cas le fluide ne fait qu'une seul passe .

4.4.4 La 4 ème simulation :

La simulation se fera selon la disposition des fluides

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Tableau 7: les résultats obtenus selon la disposition de fluide.

	Co-courant	Contre-courant	Courant croisées
Disposition du fluide	Deux fluides parallèles	Deux fluides Parallèles.	Deux fluides perpendiculaires
	Même sens	Sens contraire	Sens croisé
	Faible efficacité.	Plus efficace	Meilleure efficacité.
	Retiré la chaleur du liquide dans une certaine mesure	Plus petit En fonction de débit et de température	Surface d'écoulement minimale
	Echangeur de chaleur avec grand espace.	Economiseur l'espace et l'argent	Simple à fabriquer
	Cas refroidissement	Cas de réchauffement Les performances de transfert de chaleur jusqu'à 15% plus efficace.	

❖ Commentaires :

Pour la disposition du fluide, on peut la choisir selon nos exigences c'est-à-dire de connaître avant le choix de l'installation à implémenter, l'emplacement de la source chaude et celle de la source froide pour savoir ce que nous devons faire. Si la disposition est exigée, cela devient une contrainte et non un choix. Mais dans le cas inverse, notre choix sera déterminé par l'objectif du réchauffement de fluide.

4.5 Les Types proposé pour la réalisation:

D'après les résultats de la simulation du cas de l'industrie BIBILA, cet outil nous permet d'aboutir à deux choix possible :

- Le premier, consiste en un échangeur de chaleur serpentin qui contient les caractéristiques déjà mentionner , il reste de définir juste les matériaux.
- Comme deuxième propositions, il s'avère qu'un nouveau type d'échangeur de chaleur est sur le marché technologique. C'est l'échangeur de chaleur à cheminée qui adéquat a notre cas.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Les deux liens des fournisseurs sont afficher à la fin de simulation .

Figure4- 23: les fournisseurs pour les deux choix

Fournisseurs Correspondants

Liste de fournisseurs

Fournisseur	
Alfa Laval	https://www.alfalaval.fr/
buildex tec	https://buildex.techinfus.com/fr/pechi/teploobmennik-dlya-otopeniya.
Alibaba	https://french.alibaba.com/trade/search?IndexArea=product_en&Searc

Ouvrir Site

Etude thermique d'un échangeur :

1.1 1. Les résistances thermiques

Entre deux domaines respectivement à la température T_1 et T_2 , le flux Φ transitant dans un tube est égal à $\frac{T_1 - T_2}{R}$ d'où R est la résistance entre ces deux domaines.

En convection : pour une surface dS , la résistance thermique s'écrit sous la forme $\frac{1}{h \cdot dS}$

En conduction : la résistance thermique entre deux plans parallèles de surface dS est égal à $\frac{e}{\lambda \cdot dS}$ Dans le cas d'un tube de longueur dL et de rayon extérieur r_2 et intérieur r_1 , cette résistance thermique s'écrit sous la forme $\frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot dL} \ln \frac{r_2}{r_1}$.

Dans les échangeurs le transfert ne s'effectue que par convection et conduction (le transfert par rayonnement est négligeable). Les différentes résistances étant en série, il suffit de les additionner.

Pour un tube de longueur dL , de rayon extérieur r_2 et intérieur r_1 , cette résistance devient :

$$dR_T = \frac{1}{2\pi \cdot dL} \left(\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_2 \cdot r_2} \right)$$

1.2 2. Bilan thermique :

Pour déterminer les échanges thermiques qui ont eu lieu dans l'échangeur. On va faire un bilan thermique afin d'améliorer sa performances, ou de les calculer pour assurer certains impératifs. Ce type de bilan peut être utilisé pour la plupart des procédés. Dans notre cas on a deux fluides qui circulent sans être en contact.

Les fluides froid et chaud sont respectivement définis par les grandeurs suivantes : débits massiques (\dot{m} et \dot{m}'), chaleurs massiques moyennes (C_p et C_p'), températures d'entrée (T_e et T_e') et de sortie (T_s et T_s').

On doit définir les flux de chaleur qui correspondent à des gains ou pertes d'énergie par unité de temps pour un fluide. Ce sont donc des puissances thermiques exprimées en W ou souvent encore en $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$. Dans le cas le plus général le flux de chaleur s'écrit comme la somme d'un terme dû à une variation de température, on écrit pour chaque fluide les puissances thermiques (appelées aussi « flux de chaleur ») respectivement perdu par le fluide chaud et gagné par le fluide froid :

Pour le fluide chaud : $\Phi_c = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{cs} - T_{ce})$

Pour le fluide froid : $\Phi_f = \dot{m}_f \cdot C_{pf} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$

On doit bien remarquer que les différences de température s'expriment entre la température de sortie et la température d'entrée pour un procédé continu (entre la température finale et la température initiale pour un procédé discontinu).

Par application du principe de la conservation de l'énergie on écrit donc le bilan suivant:

$$\Phi_c + \Phi_f + \Phi_{\text{pertes}} = 0 \text{ (avec } \Phi_{\text{pertes}} < 0\text{)}$$

Il y a toujours des pertes, mais si les transferts entre les corps froid et chaud sont suffisamment rapides, alors, les pertes n'auront pas le temps de prendre de l'importance.

$$\Phi_c + \Phi_f = 0$$

Dimensionnement de l'échangeur

Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique mais également sur la prise en compte des pertes de charges. La puissance d'un échangeur peut s'écrire de la manière suivante : $Q = U \cdot S \cdot \Delta TLM$

Avec :

U: le coefficient de transmission thermique surfacique moyen (en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

S : la surface d'échange (m^2).

ΔTLM : représente la différence de température moyenne entre les deux fluides, dans une section donnée de l'échangeur ($^\circ C$).

On est obligé de raisonner sur des valeurs moyennes de U et de ΔTLM dans la mesure où les températures des deux fluides et le coefficient U varient d'un endroit à l'autre de l'échangeur.

1.3 Le cas de la société :

- Le choix technologique.
- Détermination de la puissance thermique.
- Le calcul des pertes de charges.
- Détermination de rendement.

○ Le Calcul de la surface S :

D'après le choix technologique on a fixé un échangeur serpentin de fluide liquide/gaz. Destiné vers le secteur agroalimentaire .avec $P=25\text{Bar}$, $T_{\text{max}}=200^\circ C$, avec un nettoyage facile et un bon encrassement. Lié à une compacité de $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$. On a la compacité c'est le rapport de surface sur le volume.

$$C = \frac{S}{V} \longrightarrow \begin{cases} V = \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} \cdot h. \\ C = 200 \text{ m}^2/\text{m}^3 \end{cases} \longrightarrow V = 0.0490873852 \text{ m}^3$$

$$S = 200 \times 0.0490873852 \longrightarrow$$

$$S = 9.81747704m^2$$

○ **Le Calcul de ΔTLM :**

Les températures trouvées :

$$T_{fe} = 25^\circ C ; T_{fs} = 50^\circ C (\text{souhaitée}) ; T_{ce} = 152^\circ C ; T_{cs} = 120^\circ C.$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad \begin{cases} \Delta T_1 = T_{cs} - T_{fe} \\ \Delta T_2 = T_{ce} - T_{fs} \end{cases}$$

$$\Delta TLM = \frac{(152-50)-(120-25)}{\ln \frac{102}{95}} = 98.4585309 \text{ }^\circ K$$

$$\Delta TLM = 98.4585309^\circ K$$

○ **Le Calcul de coefficient global U :**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{K_{acier}} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef}}$$

$$1/h_c = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{(152-120)}{8000 \times 0.75 \div 3600 \times 10.7 \times (152-120)} = 0.0560747664 \text{ } W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$$

$$\frac{1}{h_f} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\Delta T}{\rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{50-25}{10^{-3} \times 0.001060 \times 4180 \times (50-25)} = 0.000225692877 \text{ } W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$$

$$e = 5 \cdot 10^{-2} m, \quad K_{acier} = 50 \text{ } W/m \cdot K \quad \text{ou} \quad \frac{e}{K_{acier}} = 10^{-3} m^2 \cdot K/W$$

$$R_{ec} (\text{air industriel}) = 4 \cdot 10^{-4} W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$$

$$R_{ef} (\text{eau traité pour les chaudière}) = 2 \cdot 10^{-4} W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$$

$$U = \frac{1}{0.0560747664 + 0.000225692877 + 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-4}} = 17.2710202 \text{ } W/m^2 \cdot K$$

○ **La détermination de la puissance thermique de l'échangeur :**

$$Q = U \cdot S \cdot \Delta TLM = 17.2710202 \times 9.81747704 \times 98.4585309$$

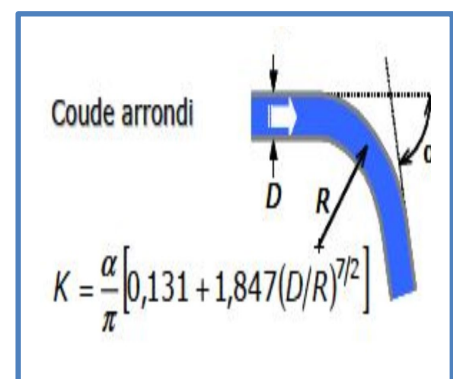
$$Q = 16694.4162 \text{ } W$$

○ **Les pertes de charges :**

Les pertes régulières :

$$\Delta P_r = \frac{2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \Delta L}{2\phi}$$

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \longrightarrow L = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R} = 12,5 \text{ } m$$



$$\Delta P_r = \frac{2 \times 10^3 \times 1,5 \times 12,5}{2 \times 250 \times 10^{-3}} = 7031,25 \text{ Pa}$$

Les pertes singulières :

$$\Delta P_s = K \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

$$K = \frac{\alpha}{\pi} \left[0.131 + 1.847 \left(\frac{\phi}{R} \right)^{7/2} \right] \longrightarrow \alpha_1 = 30^\circ \text{ et } \alpha_2 = 60^\circ$$

$$\phi = 30 \text{ mm et } R = 250 \text{ mm}$$

$$K_1 = 0.022 \text{ et } K_2 = 0.044 \longrightarrow \Delta P_{s30^\circ} = 24.75 \text{ Pa et}$$

$$\Delta P_{s60^\circ} = 49.5 \text{ Pa}$$

Conclusion Générale :

La chaleur fatale est une source d'énergie énorme gaspillée dans la nature, que nous devons réutiliser sous n'importe quelle forme afin d'assurer nos besoins en énergie. Pour cette récupération, diverses technologies sont utilisées (les échangeurs, évaporateurs, les pompes à chaleur, économiseurs, éjecto-compresseurs, les thermo acoustiques, les turbines « cycle organique de Rankine »...etc). Cette récupération énergétique permet la production énergétique sous forme directe ou indirecte dans un but économique et environnemental pour le client.

Dans la majorité des cas, la technologie utilisée est basée sur l'échangeur de chaleur, toutefois, le choix et leurs dimensionnement sont complexes.

La problématique qui nous a été posée par l'industrie agroalimentaire BIBILA est de remplacer le système existant par chauffer et maintenir le chocolat de glaçage à une température fixe. Le système utilisé actuellement est très énergivore et est souvent en panne. La solution souhaitée est d'assurer le processus par une installation alternative simple et qui ne soit pas très coûteuse énergétiquement.

Notre proposition est une installation basée sur la récupération de l'énergie fatale dégagée par les fours de cuisson ceci est réalisé par un échangeur de chaleur, associé à une cuve de stockage d'eau chaude qui permettra de chauffer le chocolat et la maintenir à une température fixe.

Pour le choix de l'échangeur, un algorithme basé sur la méthode heuristique de descente est appliquée. Des critères de choix sont classés par ordre de priorité, cet algorithme est traduit en un DSS (outil à l'aide de décisions) sous forme d'une interface graphique. Plusieurs simulations sont réalisées en changeant plusieurs paramètres de choix. Les résultats obtenus nous permettent d'avoir la fiche technique de l'échangeur adéquat. Un lien dans l'interface nous donne la possibilité de contacter le ou les fournisseurs dans le cas où ce type d'échangeur de chaleur n'est pas disponible, un lien (électronique) nous dirige vers un logiciel de dimensionnement de l'échangeur de chaleur nécessaire.

Il est remarqué qu'il existe un nouveau type des échangeurs de chaleur sur le marché, qui est l'échangeur à cheminée. C'est un excellent choix pour notre cas.

On retiendra que l'interface graphique est très facile à utiliser. Des help permettent de guider le choix de l'utilisateur. Cet outil peut être aussi intéressant dans le cadre didactique (TP ou autre pour les étudiants) en thermique.

Les perspectives de ce travail sont :

- Développer le DSS sous forme modulaire.
- Rajouter des autres technologies pour la récupération indirecte avec une méthodologie de choix.
- Enrichir le logiciel par un outil qui permettra la récupération dans les autres secteurs (transport et habitat).
- Rajouter les autres technologies tel que les pompes, les turbines..etc. selon la forme d'énergie voulue, leurs fournisseurs, leur dimensionnement s'il existe.
- Intégrer la résolution du problème de la corrosion.
- Rendre l'interface comme une application web.

Références

1. *www.enerdata.fr*. [En ligne]
2. **Oukass Walid, Brahim Abderraouf**. Mémoire de Master. *La production de puissance par la récupération de la chaleur par l'intermédiaire de cycle Kallina*. s.l. : Université de Saad Dahleb Blida -1-, 11 12 2019.
3. <https://www.ecologie.gouv.fr/chaleur-recuperation-des-processus-industriels>. [En ligne]
4. **ADEME**. Récupération de chaleur fatale Enjeux, potentiels et accompagnements. Centre de recherche France, 06/04/2018.
5. Décret n 1014-1363 du 16/11/2014.
6. U.S.Sets Heiger Fuel Efficiency Standars [archive],BILL VLASIC, The New York Times. [En ligne] 2012 08 28.
7. <http://www.recuperation-chaleur.fr/ou-recuperer-chaleur>. [En ligne]
8. ADEME. La chaleur fatale industrielle . 22/01/2021.
9. <https://www.energy.gov.au/business/equipment-and-technology-guides/waste-heat-recovery>. [En ligne]
10. <http://www.recuperation-chaleur.fr/les-technologies-de-recuperation>. [En ligne]
11. ADEME. Assises Européennes de la transition énergétique . s.l. : Dunkerque 22ème édition .
12. PITON, Maxime. Récupération de la chaleur fatale: application aux fours rotatifs. 2016. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Nantes.
13. Samuel Gendebien, Ludovic Guillaume, Sebastian Andres Bellochio Domke , Pol François Bertrand _Etude expérimentale et numérique d'un échangeur destiné à la récupération de la chaleur fatale sur bancs d'essais de moteur aéronautique_ 2017 .
14. HAMPIKIAN, Zélia. Distribuer la chaleur fatale des entreprises: la construction dynamique d'un réseau d'énergie décarbonée, entre flux et infrastructure. Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, 2017, vol. .
15. MADOUNI et OUDNI _Etude de la faisabilité de récupérer les rejets thermiques de La centrale de Cap-Djinet._ 2017.
16. WOOLLEY, Elliot, LUO, Yang, et SIMEONE, Alessandro. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018, vol. 29, p. 50-59.

17. **Hussan Jouhara, Navid Khordehgh, Sulamani Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A. Tassou.** *Waste heat recovery technologies and applications*. s.l. : Institut of Energy Futures, College of Engineering, Design and physical Sciences, Brunel University London, UBB 3PH, UK, 2018.
18. Alexandre Leclercq_ *Un formalisme générique pour la planification des systèmes énergétiques application à la valorisation de la chaleur fatale.* 2019 .
19. Samuel CHICHE_ *Intégration de sources urbaines de chaleur fatale au sein d'un réseau de chaleur* . Juin 2020.
20. XU, Bin et LI, Xiaoya. A Q-learning based transient power optimization method for organic Rankine cycle waste heat recovery system in heavy duty diesel engine applications. *Applied Energy*, 2021, vol. 286, p. 116532.
21. **Regis OLIVES, Aubin TOUZO.** *Modélisation analytique d'un stockage thermocline pour la récupération de chaleur fatale ou pour centrale solaire à concentration.* s.l. : Laboratoire PROMES-CNRS UPR 8521, Université de Perpignan Via Domitia Rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan, 2021.
22. **Bin Hu, Hua Liu, Jiatong Jiang, Zhiping Zhang, Hongbo Li, R.Z. Wang.** Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: Onsite application research. 2012.
23. ARGYROU, Maria C., CHRISTODOULIDES, Paul, et KALOGIROU, Soteris A. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 94, p. 804-821.
24. JUN LU, Jean-Michel Baleynaud , Jie Zheng , Feng Huang , J.M Baleynaud _ *Potentiel et technologies de récupération de chaleur dans les zones industrielles.* 2022.
25. **S. BEGOT, M. Z. GETIE, A. DIALLO, F. LANZETTA, M. BARTHES, M. de LABACHELERIE.** *Conception et modélisation d'une micro-machine Stirling.* 2021 : Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS, Department Energie 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort, France.
26. *Performance assessment of annular thermoelectric generators for automobile exhaust waste heat recovery.* **Shen, Bin Huang et Zu-Guo.** 1 mai 2022, Sciencedirect.
27. *la société de bibila.*
28. **S, André BONTEMP.** *Echangeur de chaleur - Définitions et principes généraux.* 10 janv. 2014. <https://www.techniques-ingenieur.fr> consulté le 25/05/2022.
29. totalenergies. www.totalenergies.fr. [En ligne] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/echangeur-thermique-fonctionnement-types-et-efficacite>.

30. **Weber Christophe Et Magnificat André.** *Echangeurs De Chaleur*,. s.l. : Journal De Greth,055,(P3-17) , Février 2016.
31. <https://www.labbe-france.fr/echangeur-de-chaleur/echangeur-tubulaire/>. [En ligne]
32. Total, *Support De Formation Exp-Pr-Eq120-Fr*, “Les Equipements-Les Echangeurs”, . (P14-44),16/04/2007.
33. **Patrice Clément, Nadia Caney, Philippe Marty, Philippe Bandelier, Zoé Minvielle, Claude Roussel, Jean Antoine Gruss**, “Echangeurs De Chaleur-Description”, *Journal De Technique De L’ingénieur*, Be9516, (P 1–27), . Janvier 2014.
34. [:http://gsi-energie.univ-rouen.fr/IMG/pdf/cours-iup-me-echangeurthermique-2.pdf](http://gsi-energie.univ-rouen.fr/IMG/pdf/cours-iup-me-echangeurthermique-2.pdf). [En ligne]
35. <https://energieplus-lesite.be/technique>. [En ligne]
36. Total, *Support De Formation Exp-Pr-Eq120-Fr*, “Les Equipements-Les Echangeurs”, (P14-44), . 16/04/2007.
37. **Patrice Clément, Nadia Caney, Philippe Marty, Philippe Bandelier, Zoé Minvielle, Claude Roussel, Jean Antoine Gruss**, “Echangeurs De Chaleur-Description”, *Journal De Technique De L’ingénieur*, Be9516, (P 1–27), Janvier 2014.
38. **Ramesh K. Shah , Dušan P. Sekulic**, “*Fundamentals Of Heat Exchanger Design*”, John Wiley & Sons, Inc., 2003].
39. **Patrice Clément**, “Echangeurs De Chaleur-Problèmes De Fonctionnement”, *Journal De Technique De L’ingénieur*, Be9519, (P 2–3), Avril 2014.
40. *Ecole Nationale d’Ingénieurs de Monasti, Support de cours :2eme année Génie Energétique ,2017/2018, Mme.J.Sghaier*].
41. **André Bontemps, Jean-François Fourmigué**, “Echangeurs De Chaleur Dimensionnement Thermique”, *Journal De Technique De L’ingénieur*, Be9517, (P 2–14), Octobre 2014.
42. *Ecole Nationale d’Ingénieurs de Monasti, Support de cours :2eme année Génie Energétique ,2017/2018, Mme.J.Sghaier*.
43. **Yves Jannot , Christian Moyne**, “*Transferts Thermiques-Introduction Aux Echangeurs De Chaleur*”, Edlivre. 27 Avril 2016.
44. [Http://Www.Barriquand.Com/Fr/Actualites-News/Dimensionnement-Un-EchangeurChaleur-Mode-Emploi-Calcul](http://Www.Barriquand.Com/Fr/Actualites-News/Dimensionnement-Un-EchangeurChaleur-Mode-Emploi-Calcul) (Consulté Le 18/05/2022). [En ligne]
45. BLIDA : société BIBILA, 2022.
46. www.azprocede.f [En ligne]
https://www.azprocede.fr/Cours_GC/echangeur/calc_deltaT09.gif.

47. *Echangeurs De Chaleur-Dimensionnement*. **André Bontemps, Jean-François Fourmigué**. octobre 2014, Journal De Technique De L'ingénieur.

48. <https://www.labbe-france.fr/echangeur-de-chaleur/echangeur-tubulaire>. [En ligne]